



⑬ **BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND**



**DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT**

⑫ **G brauchsmust rschrift**
⑩ **DE 298 23 884 U 1**

⑤ Int. Cl.⁷:
G 01 B 11/03

⑳ Aktenzeichen: 298 23 884.5
⑦ Anmeldetag: 10. 6. 1998
aus Patentanmeldung: PCT/EP98/03526
④ Eintragungstag: 24. 2. 2000
④ Bekanntmachung
im Patentblatt: 30. 3. 2000

⑥ Innere Priorität:

297 10 242. 7	12. 06. 1997
197 43 969. 1	06. 10. 1997
198 05 892. 6	13. 02. 1998

⑦ Inhaber:

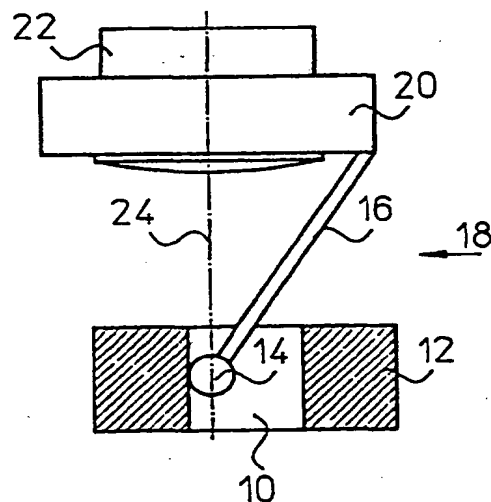
Werth Messtechnik GmbH, 35394 Gießen, DE

⑧ Vertreter:

Stoffregen, H., Dipl.-Phys. Dr.rer.nat., Pat.-Anw.,
63450 Hanau

⑤ Koordinatenmessgerät zur Messung von Strukturen eines Objekts

⑦ Koordinatenmessgerät zur Messung von Strukturen eines Objekts (12) mit einem Tastelement (14) und eine Tastverlängerung (16, 38) umfassenden Taster, einem Sensor zur optischen Bestimmung des Tastelements (14) und/oder zumindest einer diesem unmittelbar zugeordneten Zielmarke, und einer Auswerteeinheit, mit der aus der Position des optischen Sensors zum Koordinatensystem des Koordinatenmessgerätes und der mittels des optischen Sensors unmittelbar gemessenen Position des Tastelements und/oder der Zielmarke die Strukturen berechenbar sind, dadurch gekennzeichnet, dass die Tasterverlängerung (16, 38) biegeelastisch ausgebildet ist.



DE 298 23 884 U 1

DE 298 23 884 U 1

Werth Messtechnik GmbH
Siemensstraße 19
35394 Gießen

Beschreibung

Koordinatenmessgerät zur Messung von Strukturen eines Objekts

Die Erfindung bezieht sich auf ein Koordinatenmessgerät zur Messung von Strukturen eines Objekts mit einem ein Tastelement und eine Tasterverlängerung umfassenden Taster, wobei das Koordinatenmeßgerät einen Sensor zur optischen Bestimmung des Tastelements und/oder zumindest einer diesem unmittelbar zugeordneten Zielmarke sowie eine Auswerteeinheit umfasst, mit der aus der Position des optischen Sensors zum Koordinatensystem des Koordinatenmessgerätes und der mittels des optischen Sensors unmittelbar gemessenen Position des Tastelements bzw. der Zielmarke die Struktur berechnet wird.

Zur Messung von Strukturen eines Objektes werden Koordinatenmessgeräte mit elektromechanisch arbeitenden Tastern verwendet, mit denen auf indirektem Wege die Strukturlage bestimmt wird, d. h., die Position des Antastelementes (Kugel) wird über einen Taststift übertragen. Die hierbei auftretenden Verformungen des Taststiftes in Verbindung mit den wirkenden Reibkräften führen zur Verfälschung der Messergebnisse. Durch die starke Kraftübertragung kommt es ferner zu Messkräften, die typischerweise größer als 10 N sind. Die geometrische Ausgestaltung solcher Tastsysteme beschränkt diese auf Kugeldurchmesser größer als 0,3 mm. Die dreidimensionale Messung kleiner Strukturen im Bereich von wenigen Zehntel Millimetern und das Antasten von leicht verformbaren Prüflingen ist somit problematisch bzw. nicht möglich. Bedingt durch die nicht vollständig bekannten Fehlereinflüsse durch Verformung durch Taststift und Tastelement sowie die aufgrund z. B. von Stick-Slip-Effekten unbekannten Antastkräfte entstehen Messunsicherheiten, die typischerweise größer als 1 µm sind.

Ein entsprechendes mechanisch abtastendes Koordinatenmessgerät ist zum Beispiel der DE 43 27 250 A1 zu entnehmen. Dabei kann eine visuelle Kontrolle des mechanischen Antastvorganges mit Hilfe eines Monitors erfolgen, indem der Tastkopf über eine Videokamera beobachtet wird. Dabei kann gegebenenfalls der Tastkopf in Form eines sogenannten Schwingquarztasters ausgebildet sein, der bei Berührung mit der Werkstückoberfläche gedämpft wird. Mittels der Videokamera ist es somit möglich, die Position der Tastkugel relativ zum Werkstück bzw. der dort zu vermessenden Bohrung auf dem Monitor zu verfolgen und den Antastvorgang beim Eintauchen in die Bohrung manuell zu beobachten und zu steuern. Das eigentliche Messen erfolgt wiederum elektromechanisch, so dass die oben genannten Nachteile erhalten bleiben.

Eine optische Beobachtung eines Tastkopfes bei einem Koordinatenmessgerät ist auch der DE 35 02 388 A1 zu entnehmen.

Um die genaue Position der Maschinenachsen eines Koordinatenmessgerätes zu bestimmen, werden nach der DE 43 12 579 A1 zumindest sechs Sensoren an einer Pinole und/oder einem Messkopf angebracht, um den Abstand zu einer Referenzfläche bestimmen zu können. Auf das Antasten der Objektgeometrien wird hier nicht weiter eingegangen, sondern ein berührungsloses Verfahren als Ersatz für klassische inkrementelle Wegmesssysteme beschrieben.

In der US 4,972,597 wird ein Koordinatenmessgerät mit einem Taster beschrieben, dessen Tasterverlängerung mittels einer Feder in ihrer Position vorgespannt ist. Ein in einem Gehäuse verlaufender Abschnitt der Tasterverlängerung weist zwei zueinander beabstandete Licht emittierende Elemente auf, um mittels eines Sensorelementes die Position der Tasterverlängerung und damit indirekt die eines am äußeren Ende der Tasterverlängerung angeordneten Tastelementes zu bestimmen.

Die optische Sensorik ersetzt hier ebenfalls die klassischen Wegmesssysteme von elektromechanischen Tastsystemen. Der eigentliche Antastvorgang erfolgt wiederum via Kraftübertragung von Tastelement zum Taststift über Federelemente zum Sensor. Die oben genannten Probleme mit Durchbiegung und Antastkraft bleiben wiederum erhalten. Es handelt

sich um ein indirektes Verfahren.

Um große Körper wie Flugzeugteile zu vermessen, sind Taststifte mit Lichtquellen bzw. reflektierenden Zielmarken bekannt, deren Positionen optisch erfasst werden (DE 36 29 689 A1, DE 26 05 772 A1, DE 40 02 043 C2). Die Taster selbst werden von Hand oder mittels eines Roboters entlang der Oberfläche des zu messenden Körpers bewegt.

Bei diesem Verfahren wird die Position des Tastelementes stereoskopisch durch Triangulation oder ähnliches in seiner Lage stimmt. Die Auflösung des Gesamtmesssystems ist somit direkt durch die Sensorauflösung begrenzt. Der Einsatz solcher Systeme kann somit nur bei relativ geringen Anforderungen an das Verhältnis zwischen Messbereich und Genauigkeit in Frage kommen. Praktisch ist er auf das Messen großer Teile beschränkt.

Aus der WO 93/07443 ist es bekannt, mittels optischer Sensoren Strukturen eines Objektes mittelbar zu bestimmen, wobei ein starrer Taster zumindest drei Zielmarken aufweist, die zur Bestimmung eines Koordinatenmesspunktes mit einem Winkelsensor erfasst werden.

Eine andere Möglichkeit, optisch die Strukturen eines Körpers zu messen, wird in der WO 88/07656 durch ein Interferometersystem beschrieben. Das System umfasst einen Taster mit einer stabförmigen Tasterverlängerung, an deren Ende eine Kugel angeordnet ist, die mit dem Körper in Berührung gebracht wird, dessen Position bestimmt werden soll. Die Tasterverlängerung geht von einer plattenförmigen Halterung aus, die in drei Richtungen zu dem Objekt verstellbar ist. Von den Halterungen gehen Retroreflektoren aus, die mit von Interferometern emittierter Strahlung beaufschlagt werden. Die reflektierte Strahlung wird von den Interferometern erfasst, um so den Strahlengang zwischen den Interferometern und den Retroreflektoren zur Bestimmung der Position des Gegenstandes messen zu können.

Der Veröffentlichung US-Z.: Quality, April 1998, S. 20 ff. ist der Vorschlag zu entnehmen, Strukturen eines Objektes mittels eines Tastelementes durch Bestimmung dessen Position mit einem optischen Sensor zu messen. Dabei ist es zwingend erforderlich, dass der Taster scharf abgebildet wird.

Aus der Veröffentlichung US-Z.: American Machinist, April 1994, S. 29 - 32 ist es bekannt, zur Bestimmung der Geometrie eines Werkstückes verschiedene Mess-Systeme zu nutzen. Hierbei handelt es sich um die Möglichkeit, einerseits eine Oberfläche mit einer Videokamera auszumessen und zum anderen eine taktile Messung durchzuführen, die als Alternativen abgehandelt werden.

In US-Z.: Tooling & Production, October 1990, S. 76 - 78 wird ein Taster wahlweise zum rein taktilen, also mechanischen Messen bzw. zur optischen Erfassung benutzt, um Strukturen zu bestimmen. Dabei muss der Taster, der mit dem Körper in Berührung gebracht wird, ebenfalls stets optisch klar abbildbar sein.

Der Veröffentlichung US-Z.: Plastics World, August 1989, Nr. 8, ist eine Abbildung eines Tastelementes zu entnehmen, dessen Position optisch erfasst ist. Wie die Abbildung verdeutlicht, wird ein starrer Taster benutzt, der es nicht ermöglicht, kleinste Dimensionen bzw. Materialien zu vermessen, die sehr weich sind und somit nicht mit hohen Antastkräften beaufschlagt werden dürfen, da andernfalls eine Verfälschung der Geometrie erfolgen würde. Eine entsprechende Offenbarung ergibt sich auch aus der US-Z.: Quality, Januar 1990, wie die Abbildung verdeutlicht.

Aus der Firmendruckschrift Carl Zeiss Jena, Technische Messgeräte, S. 54 und 55 ist ein Bohrungsmessmikroskop bekannt, bei dem im Durchlichtverfahren allein der Abstand zwischen zwei diametral liegenden Punkten einer zu messenden Bohrung unter mikroskopischer Beobachtung bestimmt wird.

Der vorliegenden Erfindung liegt das Problem zugrunde, eine Vorrichtung der eingangs genannten Art so weiterzubilden, dass beliebige Strukturen mit einer hohen Messgenauigkeit bestimmt werden können, wobei eine präzise Lagebestimmung des mit dem Objekt in Berührung zu bringenden Tastelementes erfolgen soll. Insbesondere soll die Möglichkeit gegeben sein, Bohrungen, Löcher, Hinterschneidungen oder ähnliches auszumessen, wobei auch Strukturen im Bereich zwischen 50 und 100 μm mit einer Messgenauigkeit von zumindest $\pm 0,5 \mu\text{m}$ bestimmt werden sollen.

Erfindungsgemäß wird das Problem im Wesentlichen dadurch gelöst, dass die Tasterverlängerung biegeelastisch ausgebildet ist.

Dabei kann das Tastelement und/oder die zumindest eine Zielmarke selbststrahlend und/oder als Reflektor ausgebildet sein.

Das Tastelement und/oder die Zielmarke sollten vorzugsweise als eine Strahlung räumlich abstrahlender oder reflektierender Körper wie Kugel oder Zylinder ausgebildet sein.

Erfindungsgemäß ist das Tastelement mit der Tasterverlängerung wie Schaft verbunden, die bzw. der biegeelastisch ausgebildet ist. Das Verbinden kann durch Kleben, Schweißen oder sonstige geeignete Verbindungsarten erfolgen. Auch kann das Tastelement und/oder die Zielmarke ein Abschnitt der Tasterverlängerung selbst sein. Insbesondere ist die Tasterverlängerung bzw. der Schaft als Lichtleiter ausgebildet oder umfasst einen solchen, um über diesen dem Tastelement bzw. der Zielmarke das erforderliche Licht zuzuführen.

Der Schaft selbst kann endseitig als Taster ausgebildet sein oder einen solchen umfassen. Insbesondere sollte das Tastelement und/oder die Zielmarke auswechselbar mit der Tasterverlängerung wie Schaft verbunden sein.

Es ist des Weiteren vorgesehen, dass der Taster von einer in fünf Freiheitsgraden justierbaren Halterung ausgeht. Die Halterung selbst kann wiederum mit dem Sensor eine Einheiten bilden bzw. mit dem Sensor verbunden sein.

Auch besteht die Möglichkeit, dass das Tastelement und/oder die Zielmarke als selbstleuchtendes elektronisches Element wie LED ausgebildet ist oder ein solches umfasst.

Erfindungsgemäß wird ein Tastsystem für Koordinatenmessgeräte vorgeschlagen, das die Vorteile optischer und mechanischer Tastsysteme kombiniert, wobei eine Verwendung insbesondere bei der mechanischen Messung sehr kleiner Strukturen, in denen herkömmliche Tastsysteme nicht mehr einsetzbar sind, möglich ist. Aber auch eine einfache Auf- und

Umrüstung optischer Messgeräte für mechanische Messaufgaben wird dadurch möglich.

So ist vorgesehen, ein Tast- oder Antastelement oder eine diesem zugeordnete Zielmarke durch einen Sensor wie elektronische Kamera in seiner Position zu bestimmen, nachdem ersteres in mechanischem Kontakt mit einem Werkstück gebracht wurde. Dadurch, dass entweder das Tastelement selbst oder die Zielmarke, die unmittelbar mit dem Tastelement verbunden ist, in der Position vermessen wird, haben Verformungen eines den Taster aufnehmenden Schaftes keinen Einfluss auf das Messsignal. Bei der Vermessung muss weder das elastische Verhalten des Schaftes berücksichtigt werden, noch können plastische Verformungen, Hysteresen und Drifterscheinungen der mechanischen Kopplung zwischen Tastelement und dem Sensor die Messgenauigkeit beeinflussen. Auslenkungen in der Richtung senkrecht zur Sensor- wie Kameraachse lassen sich direkt durch Verschiebung des Bildes in einem Sensorfeld insbesondere einer elektronischen Kamera bestimmen. Die Auswertung des Bildes kann mit einer bereits in einem Koordinatenmessgerät installierten Bildverarbeitung erfolgen. Damit ist ein zweidimensional arbeitendes Tastsystem realisiert, das sehr einfach an eine optische Auswerteeinheit gekoppelt werden kann.

Für eine Sensierung der Auslenkung in Richtung der optischen Sensor- wie Kameraachse sind erfindungsgemäß mehrere Möglichkeiten gegeben, so u. a.:

1. Die Auslenkung des Tastelements in Richtung der Sensorachse (Kameraachse) wird durch ein Fokussystem gemessen, wie dies in der optischen Koordinatenmesstechnik bei der Fokussierung auf die Werkstückoberfläche bereits bekannt ist. Hierbei wird die Kontrastfunktion des Bildes in der elektronischen Kamera ausgewertet.
2. Die Auslenkung des Tastelements in Richtung der Sensor- bzw. Kameraachse wird dadurch gemessen, dass die Abbildungsgröße einer Zielmarke ausgewertet wird, so z. B. bei einer kreis- oder ringförmigen Zielmarke die Veränderung des Durchmessers. Dieser Effekt ist bedingt durch die strahlenoptische Abbildung und lässt sich durch die Ausgestaltung der optischen Einheit gezielt optimieren. In der Koordinatenmesstechnik werden häufig sogenannte telezentrische Objektive verwendet, die eine

weitestgehend konstante Vergrößerung auch bei Abweichung von der Fokusebene realisieren sollen. Diese wird durch eine Verlegung der optischen Eintrittspupille in das "Unendliche" erreicht. Für die oben beschriebene Auswertung wäre eine Optimierung mit umgekehrten Vorzeichen nützlich: Bereits eine kleine Abweichung aus der Fokusebene soll in einer deutlichen Änderung des Abbildungsmaßstabes resultieren. Dies ist z. B. durch die Verlegung der optischen Eintrittspupille in die Höhe des objektseitigen Brennpunktes zu erreichen. Dabei sollte nach Möglichkeit eine hohe Schärfentiefe realisiert sein, die eine kontrastreiche Abbildung der Zielmarke über einen relativ weiten Entfernungsbereich erlaubt. Eine ideale optische Einheit im Sinne ihrer Abbildungseigenschaften wäre für die oben beschriebene Anwendung z. B. eine Lochkamera. Durch die Verwendung einer ringförmigen Zielmarke lassen sich Größenänderungen, die aus Unschärfe resultieren, minimieren: Der mittlere Ringdurchmesser ändert sich in erster Näherung durch Unschärfe nicht, sondern nur die Ringbreite.

3. Auch bei einer dritten Möglichkeit wird die Größenänderung der Zielmarke ausgewertet, jedoch die, welche sich aus der Kombination von strahlenoptischer Größenänderung und der scheinbaren Vergrößerung durch unscharfe Ränder ergibt. Gegenüber der Auswertung der Unschärfefunktion macht sich dieses Verfahren zunutze, dass die tatsächliche Größe der Zielmarke unveränderlich ist.

Erfindungsgemäß wird zur Strukturbestimmung von Objekten die direkte Messung einer Tastelementposition genutzt. Grundsätzlich kommen für diese direkte Messung viele unterschiedliche physikalische Prinzipien in Frage. Da die Messung der Tastelementauslenkung in einem großen Messbereich im Raum sehr genau erfolgen muss, z. B. um kontinuierliche Scanvorgänge zu ermöglichen, und um einen großen Überhub bei Objektantastung aufzunehmen (z. B. aus Sicherheitsgründen, aber auch um den Aufwand für eine genaue Positionierung zu verringern), kann auch ein photogrammetrisches Verfahren eingesetzt werden. Zwei Kamerasysteme mit zueinander geneigten Achsen könnten benutzt werden. Es können im Wesentlichen die aus der Industriephotogrammetrie bekannten Auswertetechniken eingesetzt werden.

Mit zwei z. B. zur Längsrichtung des Tastelements bzw. der diesem zugewandten Enden einer Tasterverlängerung wie Schaft geneigt "blickenden" Kameras sind alle Messaufgaben lösbar, bei denen das Tastelement nicht hinter Hinterschneidungen "verschwindet". Die Verwendung einer redundanten Anzahl von Kameras (z. B. drei) ermöglicht auch an Objekten mit steilen Konturen zu messen. Bei der Messung in kleinen Bohrungen kann eine Kamera benutzt werden, die so angeordnet ist, dass sie in Längsrichtung des Tastelements bzw. der Tasterverlängerung auf das Tastelement "blickt". Grundsätzlich ist bei zweidimensionalen Messungen (also z. B. bei Messungen in Bohrungen) eine einzige Kamera ausreichend, die auf die Längsrichtung der das Tastelement haltenden Tasterverlängerung wie Schaft ausgerichtet ist.

Für die erfindungsgemäße Verwendung des Tasters ist kein aktiv lichtabstrahlendes Tastelement oder eine sonstige aktive Zielmarke zwingend erforderlich. Besonders hohe Genauigkeiten erreicht man mit lichtabstrahlenden Tastkugeln bzw. sonstiger lichtabstrahlender Zielmarken an der Tasterverlängerung. Das Licht aus einer Lichtquelle wird dabei dem Tastelement wie -kugel oder sonstigen Zielmarken der Tasterverlängerung über z. B. eine Lichtleitfaser zugeführt, die selbst den Taster-Schaft oder die Tasterverlängerung darstellen kann. Auch kann das Licht im Schaft oder in den Zielmarken erzeugt werden, indem diese z. B. LEDs enthalten. Der Grund für diese Konstruktionsweisen ist, dass elektronische Bildsysteme wie photogrammetrische Systeme, insbesondere solche für mikroskopisch kleine Strukturen, eine hohe Lichtintensität benötigen. Wird dieses Licht dem Tastelement direkt gezielt zugeführt, reduziert sich die notwendige Lichtleistung erheblich, und somit auch die Wärmebelastung des Objekts während der Messung. Bei Verwendung von Kugeln als Tastelement ergibt sich ein ideal kontrastreiches und ideal kreisförmiges Bild der Tastkugel aus allen Blickrichtungen. Insbesondere gilt dies bei der Verwendung einer volumenstreuenden Kugel. Störungen durch Abbildungen von Strukturen des Objekts selbst werden vermieden, da das Objekt selbst nur in unmittelbarer Nähe der Tastkugel hell beleuchtet wird. Dabei wird jedoch das durch Spiegelungen am Objekt entstehende Bild der Tastkugel praktisch immer weniger hell erscheinen als die Tastkugel selbst. Somit sind Fehler problemlos zu korrigieren. Diese Vorteile haben von außen beleuchtete Zielmarken nicht zwingend. Auch besteht die Möglichkeit, die Zielmarken fluoreszierend auszuführen, so dass eingestrahltes

und abgestrahltes Licht frequenzmäßig getrennt sind, und sich somit ebenfalls die Zielmarken im Bild deutlicher von der Umgebung isolieren lassen. Gleiche Überlegungen gelten für das Tastelement selbst.

Um auch in kleinen Bohrungen oder an sehr steilen Strukturen zu messen, wenn das Tastelement wegen Abschattung selbst nicht oder nicht von mehreren Kameras erfasst werden kann, lässt sich erfindungsgemäß die Position, die Orientierung und die Krümmung der Lichtleitfaser in den sichtbaren Teilbereichen sensorisch wie photogrammetrisch erfassen. Daraus kann die Position des Tastelements berechnet werden, z. B. über einen Ansatz der Faserbiegung in Form einer Parabel mit linearem oder quadratischen Term. Die Messung bei unterschiedlichen Überhöhen (mehr oder weniger ins Objekt hinein positioniert) und anschließend Mittelung der Tastelementposition erhöht die Messgenauigkeit. Die optische wie photogrammetrische Messung der Faser wird durch eine gleichförmige Lichtabstrahlung der Faser erleichtert, die durch Verwendung von volumenstreuendem Fasermaterial, der Aufbringung einer diffus abstrahlenden Schicht auf der Faseroberfläche oder einer sonstigen geeigneten Wahl der Faserzusammensetzung und Fasergeometrie (z. B. Fertigung aus Material mit relativ geringem Brechungsindex) verbessert werden kann.

Es ist auch erfindungsgemäß möglich, auf der Lichtleitfaser weitere beleuchtete Kugeln oder sonstige Zielmarken anzubringen, die Position dieser Zielmarken insbesondere photogrammetrisch zu erfassen und die Position des Tastelements entsprechend zu berechnen. Kugeln stellen dabei vergleichsweise ideale, eindeutige Zielmarken dar, die es auf der Faser ansonsten nicht gibt. Eine gute Lichteinkopplung in die Kugeln erreicht man durch Störung der Lichtleitereigenschaften des Schafts, indem man z. B. die durchbohrten volumenstreuenden Kugeln auf den Schaft, d. h. der Tasterverlängerung aufsteckt und mit diesem verklebt. Auch können die volumenstreuenden Kugeln seitlich am Schaft angeklebt sein, wobei auch eine Lichteinkopplung möglich ist, vorausgesetzt, der Schaft führt bis zu seiner Oberfläche Licht, weist also einen Mantel an der Klebestelle nicht auf. Eine besonders hohe Genauigkeit wird erreicht, wenn die Tastelementposition als Funktion der Faserlage und Faserkrümmung (Zonen der Faser in einigem Abstand von dem Tastelement) experimentell erfasst (kalibriert) wird. Auch ist hier wieder die Abmessung von entlang der Faser aufgebrachten Zielmarken

anstelle der Abmessung der Faser selbst möglich.

Die Kalibrierung kann z. B. durch Antastung einer Kugel aus unterschiedlichen Richtungen und mit unterschiedlichen Kräften (mehr oder weniger ins Objekt "hineinpositioniert") geschehen, oder sie erfolgt durch bekannte relative Positionierung des Tastsystems gegenüber der geklemmten Tastkugel.

Die Trennung der Elemente Tastelement wie Tastkugel und Zielmarken verringert zusätzlich die Wahrscheinlichkeit einer Störung der Messung der Tastelementposition durch Reflexe der Zielmarken auf der Objektoberfläche.

Es können erfindungsgemäß mehrere Taster nacheinander im Einsatz sein, z. B. durch eine einfache Wechseleinrichtung (z. B. Revolver mit mehreren Tastern) können verschiedene Tastelemente bzw. Taststifte ins Blickfeld eingeschwenkt werden. Es können erfindungsgemäß auch mehrere Tastelemente gleichzeitig im Einsatz sein. Die Identifikation des aktiven Tastelements oder -stifts ist beispielsweise durch Abschalten der Beleuchtung der nicht aktiven Taststifte oder über eine sonstige Codierung wie z. B. durch Zielmarkengröße, Lichtfarbe, Zielmarkenposition im Tasterkoordinatensystem, Modulation des Lichts und/oder anhand aufgebrachter Muster möglich. Taststifteinsmessungen, wie diese in der klassischen Koordinatenmesstechnik üblich sind, sind bei den erfindungsgemäßen Tastern nicht zwingend erforderlich, da Tastkugellage und Tastkugeldurchmesser photogrammetrisch mit einer oft ausreichenden Genauigkeit erfasst werden können.

Die Messung mit kleinen Tastelementen bringt oft eine hohe Anzahl zerstörter Taststifte (Tastelement, Tasterverlängerung) mit sich. Bei dem erfindungsgemäßen System sind die Taststifte billig und einfach auswechselbar. Teure Sensoren und die Bewegungsachsen werden im Allgemeinen nicht von Kollisionen beschädigt oder verändert, da der Abstand von dem Tastelement recht groß sein kann. Z. B. kann die Schaftlänge größer als der Verfahrbereich des Systems sein, eine Kollision ist so nicht möglich. Eine große Taster- wie Kugelauslenkung relativ zur Schaftlänge ist ohne Schwierigkeiten möglich. Dadurch ergibt sich eine hohe Eigensicherheit des Systems und eine gute Scanfähigkeit. Auch sind hohe An-

tastgeschwindigkeiten ohne Beschädigung der Objektoberfläche möglich.

Photogrammetriesysteme oder sonstige bekannte optisch arbeitende Sensorsysteme erlauben eine mathematische Ausrichtung des Objekts vor dem eigentlichen Messbeginn aufgrund der Bildinformation über das Objektiv. Damit ist eine punktgenaue Antastung des Objekts bei der eigentlichen taktilen Messung möglich.

Es gibt bei diesem System zwei Arten von elastischen Einflüssen, die zu Messabweichungen führen können.

1. Die Nachgiebigkeit des Objekts selbst (in größeren Bereichen); Einflüsse durch diese können durch Messung mit mindestens zwei Antastkräften auf Null extrapoliert werden,
2. die lokale Nachgiebigkeit durch die Hertz'sche Pressung zwischen Kugel und Objektoberfläche; diese Effekte können bei Bedarf (also bei hochgenauen Messungen oder bei nachgiebigen Objekten) durch eine Messung mit mindestens zwei unterschiedlichen Antastkräften und Extrapolation auf die fiktive Antastkraft "Null" ausgeschaltet werden.

Die Extrapolation auf Kraft "Null" im zweiten Fall ist möglich, da die Deformation nach Hertz gleich einer Konstanten multipliziert mit der (Antastkraft)^{2/3} ist:

$$D = K \cdot F^{2/3}$$

mit:

- D: Deformation an der Kontaktstelle zwischen Objekt und Tastkugel
 F: Kraft (bzw. eine Größe, die proportional zur Antastkraft ist)
 K: Konstante

$$D_1 = K \cdot F_1^{2/3}$$

$$\begin{aligned}
 D_2 &= K \cdot F_2^{2/3} \\
 D_1 - D_2 &= K \cdot (F_1^{2/3} - F_2^{2/3})
 \end{aligned}$$

Hieraus folgt der Wert von K bei aus der Messung bekannter Differenz ($D_1 - D_2$) sowie bei bekannten F_1 und F_2 . Es können nun die Abplattungen D_1 und D_2 gegenüber der Antastung mit Kraft "Null" berechnet werden. Die kraftproportionalen Werte sind z. B. die Verfahrswege gerechnet ab der ersten Objektberührung. Alternativ lassen sich diese auch mit Kraftsensoren messen. Ein Kraftsensor kann z. B. die Faser selbst sein, wenn ihre Krümmung photogrammetrisch gemessen wird oder anhand von Änderungen des intern zur Lichtquelle reflektierten/rückgestreuten Lichts bzw. des abgestrahlten Lichts. Es ist sinnvoll, die Messung mit mehreren Antastkräften für alle hochgenauen Messaufgaben durchzuführen, da die effektiven Radien im Berührungspunkt zwischen Objekt und Tastelement durch lokale Welligkeiten und Rauheiten stark variieren können.

Liegen Hertz'sche und lineare Nachgiebigkeit in der gleichen Größenordnung, muss mit mindestens drei Kräften angetastet werden, und es muss sowohl die lineare als auch die Hertz'sche Nachgiebigkeitskonstante bestimmt werden, um auf die fiktive Kraft "Null" extrapolieren zu können.

Sollten die Abweichungen von der idealen Kugelform bei kleinen Kugeln als Taster mit Durchmessern unter 0,1 mm nicht vernachlässigbar sein, kann eine richtungsabhängige Korrektur der Antastpunkt-Koordinaten erforderlich sein. Zur Erfassung der Korrekturwerte kommen zwei Verfahren in Frage:

1. Die Messung der Abweichungen des Tastelements von der Kugelform, durchgeführt unabhängig vom Tastsystem mit gesonderten Messgeräten,
2. die Messung der Abweichungen des Tastelements von der Kugelform, durchgeführt durch Messung einer Referenzkugel mit dem Tastsystem selbst.

Grundsätzlich ist es auch möglich, eine andere Geometrieform für die Tastelemente zu

wählen als die einer Kugel, z. B. Zylinder, der die Faser selbst darstellen kann, oder das verrundete Ende der Faser selbst, als der Tasterverlängerung.

Da das Tastelement (z. B. eine Kugel) je nach Betrachtungsrichtung mehr oder weniger stark vollständig abgebildet wird und auch Schmutz sehr störend wirkt, ist es sinnvoll, die Lage des Tastelements mit sogenannten robusten Ausgleichsalgorithmen zu bestimmen. Zu diesen Algorithmen gehören z. B. die Minimierung der Summe der Abweichungsbeträge (sogenannte L1-Norm).

Zuvor geschilderte Korrekturverfahren sind jedoch nur in Extremfällen notwendig, ohne dass hierdurch die erfindungsgemäße Lehre grundsätzlich beeinträchtigt wird.

Grundsätzlich kann die Beleuchtung des Tastelements, der Zielmarken bzw. des Schafts nicht nur von innen durch den Schaft erfolgen, sondern auch durch geeignete Beleuchtungseinrichtungen von außen.

Hier bietet sich auch eine Variante an, bei der das Tastelement bzw. die Zielmarken Retroreflektoren (Tripelreflektoren, Katzenaugen, spiegelnde Kugeln) sind und aus der Kamera-Blickrichtung extern beleuchtet werden.

Der erfindungsgemäße Taster ist grundsätzlich nicht auf bestimmte Baugrößen der Messobjekte und des Tastelements selbst beschränkt. Er kann sowohl zur Messung ein-, zwei- als auch dreidimensionaler Strukturen eingesetzt werden. Insbesondere kann die Tasterverlängerung als Lichtleiter ausgebildet sein und einen Durchmesser von 20 μm aufweisen. Der Durchmesser des Tastelements wie Tastkugel sollte dann bevorzugterweise 50 μm betragen.

Insbesondere ist vorgesehen, dass der Durchmesser des Tastelementes in etwa 1- bis 3-fach größer als der der Tastverlängerung ist.

Um die Bruchfestigkeit der Tasterverlängerung zu erhöhen, können bei der Verwendung von Lichtleitern als Material diese eine Oberflächenbeschichtung wie Teflon oder eine sonstige

bruchhemmende Substanz aufweisen. Eine Ummantelung kann z. B. durch Sputtering ausgebildet werden.

Die Raumlage des Tastelements kann mittels eines zweidimensionalen Messsystems dann bestimmt werden, wenn dem Tastelement zumindest drei Zielmarken zugeordnet sind, deren Bilder zur Bestimmung der räumlichen Lage des Tastelements ausgewertet werden.

Die Erfindung ermöglicht auch ein scannendes Antastverfahren zur Bestimmung von Werkstückgeometrien. Insbesondere können die auszuwertenden Bilder von einem positionsempfindlichen Flächensensor erzeugt werden.

Gegenüber rein mechanisch messenden Tastsystemen ergeben sich mit der erfindungsgemäßen Lehre u.a. folgende Vorteile:

- Elastische und plastische Einflüsse sowie Kriecherscheinungen der mechanischen Halterung und des Antastschaftes gehen nicht in das Messergebnis ein.
- Es lassen sich sehr geringe Antastkräfte realisieren ($< 1 \text{ N}$).
- Es ist keine Präzisionsmechanik erforderlich.
- Es lassen sich sehr kleine Tastelemente und Schaftdurchmesser realisieren.
- Die Positionierung des Tastsystemes kann durch die Optik vom Bediener optimal überwacht werden.
- Das System kann direkt an die bestehende Optik eines Koordinatenmessgerätes angebracht werden und das Bildsignal mit einem vorhandenen Bildprozessor ausgewertet werden.

- Geringer Geräteaufwand resultierend aus der Adaption an bestehende optische Koordinatenmessgeräte.

Gegenüber rein optisch messenden Tastsystemen ergeben sich u. a. folgende Vorteile:

- Es werden die tatsächlichen mechanischen Größen gemessen. Eigenschaften der Oberfläche wie Farbe und Reflexionsverhalten gehen nicht in das Messergebnis ein.
- Es können Messungen an dreidimensionalen Strukturen gemacht werden, die für rein optische Systeme nicht zugänglich sind. So lässt sich etwa der Durchmesser und die Formabweichung einer Bohrung in verschiedenen Höhenschnitten erfassen.

Zur Messung kann das Tastelement und/oder die zumindest eine Zielmarke vom Bereich des optischen Sensors her in die zu messende Position gebracht werden.

Mit anderen Worten wird der Taster dem Objekt von dessen sensorzugewandten Seite zugeführt. Taster und Sensor sind dabei als Einheit innerhalb eines Koordinatenmessgerätes verstellbar und deren gemeinsame Position hochgenau messbar. Es erfolgt demnach eine gekoppelte Bewegung, die eine geringe Unsicherheit der Ergebnisse sicherstellt. Dabei wird insbesondere die Position des Tastelements und/oder der zumindest einen Zielmarke mittels reflektierender und/oder das Objekt durchdringender und/oder von dem Tastelement bzw. der Zielmarke abstrahlender Strahlung mit dem Sensor bestimmt.

Erfindungsgemäß wird die durch Berührung des Objekts bedingte Position des Tastelements optisch bestimmt, um unmittelbar aus der Position des Tastelementes selbst bzw. einer Zielmarke den Verlauf einer Struktur zu messen. Dabei kann die Auslenkung des Tastelements durch Verschiebung des Bildes auf einem Sensorfeld eines elektronischen Bildverarbeitungssystems mit elektronischer Kamera erfasst werden. Auch besteht die Möglichkeit, die Auslenkung des Tastelements durch Auswerten einer Kontrastfunktion des Bildes mittels eines elektronischen Bildverarbeitungssystems zu bestimmen. Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung der Auslenkung besteht darin, diese aus einer Größenänderung des Bildes einer

Zielmarke zu bestimmen, aus dem der strahlenoptische Zusammenhang zwischen Objekt-Abstand und Vergrößerung resultiert. Auch kann die Auslenkung des Tastelements durch scheinbare Größenänderung einer Zielmarke ermittelt werden, die aus dem Kontrastverlust durch Defokussierung resultiert. Dabei wird grundsätzlich die Auslenkung senkrecht zur optischen Achse der elektronischen Kamera bestimmt. Alternativ kann die Position des Tastelements bzw. der zumindest einen diesem zugeordneten Zielmarke mittels eines Photogrammetriesystems bestimmt werden. Bei Vorhandensein mehrerer Zielmarken kann deren Positionen optisch erfasst und sodann die Position des Tastelements berechnet werden, da zwischen diesem und den Zielmarken eine eindeutige feste Beziehung besteht.

Abweichend vom vorbekannten Stand der Technik erfolgt erfindungsgemäß eine unmittelbare Positionsmessung des Tastelementes oder der dieser zugeordneten Zielmarke, um die Struktur eines Objektes zu bestimmen. Dabei weisen Tastelement und Zielmarke eine eindeutige räumliche Zuordnung derart auf, dass eine Relativbewegung zueinander nicht erfolgt, also geringe Abstände eingehalten werden. Hierdurch ist es unbeachtlich, ob die Tasterverlängerung, von der die Zielmarke bzw. das Tastelement ausgehen, beim Messvorgang verformt wird, da nicht - wie der Stand der Technik es vorsieht - eine indirekte Messung des Tastelementes bzw. der Zielmarke, sondern eine direkte Messung dieser erfolgt. Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren können Löcher, Bohrungen, Vertiefungen, Hinterschneidungen oder sonstige Strukturen mit einer Erstreckung im Bereich von zumindest 50 - 100 µm mit einer Messgenauigkeit von zumindest $\pm 0,5$ µm ausgemessen werden. Somit ergibt sich die Möglichkeit, dreidimensionale Messungen kleinster Strukturen durchzuführen, ein Verlangen, das seit langem zum Beispiel in der Medizintechnik für minimalinvasive Chirurgie, in der Mikrosensorik oder Automobiltechnik, soweit zum Beispiel Einspritzdüsen betroffen sind, besteht, ohne dass es befriedet werden konnte. Durch die unmittelbare Messung der Tastelementposition bzw. der dieser eindeutig zugeordneten zueinander relativ nicht verschiebbaren Zielmarke wird ein direktes mechanisch-optisches Messverfahren mit einem Koordinatenmessgerät zur Verfügung gestellt, welches mit hoher Präzision arbeitet und auch dann nicht zu Verfälschungen von Messergebnissen führt, wenn die Tasterverlängerung beim Messvorgang verformt werden sollte.

Weitere Einzelheiten, Vorteile und Merkmale der Erfindung ergeben sich nicht nur aus den Ansprüchen, den diesen zu entnehmenden Merkmalen - für sich und/oder in Kombination -, sondern auch aus der nachfolgenden Beschreibung von der Zeichnung zu entnehmenden bevorzugten Ausführungsbeispielen.

Es zeigen:

- Fig. 1 eine Ausführungsform einer Anordnung zur Messung von Strukturen eines Objekts,
- Fig. 2 eine zweite Ausführungsform einer Anordnung zur Messung von Strukturen eines Objekts,
- Fig. 3 eine dritte Ausführungsform einer Anordnung zur Messung von Strukturen eines Objekts,
- Fig. 4 eine vierte Ausführungsform einer Anordnung zur Messung von Strukturen eines Objekts,
- Fig. 5 eine fünfte Ausführungsform einer Anordnung zur Messung von Strukturen eines Objekts,
- Fig. 6 eine sechste Ausführungsform einer Anordnung zur Messung von Strukturen eines Objekts,
- Fig. 7 einen Abschnitt einer ersten Ausführungsform eines Tasters,
- Fig. 8 einen Abschnitt einer zweiten Ausführungsform eines Tasters,
- Fig. 9 einen Abschnitt einer dritten Ausführungsform eines Tasters,

Fig. 10 eine siebte Ausführungsform einer Anordnung zur Messung von Strukturen eines Objekts,

Fig. 11 eine achte Ausführungsform einer Anordnung zur Messung von Strukturen eines Objekts und

Fig. 12 ein Blockschaltbild.

In den Figuren, in denen gleiche Elemente grundsätzlich mit gleichen Bezugszeichen versehen sind, sind rein prinzipiell verschiedene Ausführungsformen von Anordnungen zur Messung von Strukturen eines Objektes mittels eines einem Koordinatenmessgerät zugeordneten Tasters dargestellt. Als Ausführungsbeispiel soll die Struktur einer Bohrung 10 in einem Objekt 12 bestimmt werden. Der Rand der Bohrung 10 wird von einem Tastelement 14 abgefahren, der seinerseits von einer Tasterverlängerung 16 ausgeht, die zusammen eine Taster 18 bilden.

Der Taster 18 geht von einer Halterung 20 aus, die zumindest um drei Freiheitsgrade, vorzugsweise um 5 Freiheitsgrade justierbar ist. An der Halterung 20 selbst ist vorzugsweise eine Optik eines Koordinatenmessgeräts 22 montiert. Eine andere Verbindungsart ist gleichfalls möglich. Ausschlaggebend ist jedoch, dass die Optik bzw. ein Sensor des Koordinatenmessgeräts 22 als Einheit mit dem Tastelement 14 in X-, Y- und Z-Richtung verstellbar ist. Unabhängig davon erfolgt eine Justierung des Tastelements 14 zur optischen Achse 24 und zur Fokalebene. Dabei bestehen verschiedene Möglichkeiten, das Tastelement 14, d. h. im Ausführungsbeispiel eine Tastkugel im Schnittpunkt der optischen Achse 24 mit der Fokalebene zu positionieren. So kann nach dem Ausführungsbeispiel der Fig. 1 die Tasterverlängerung 16 seitlich von der Halterung 20 ausgehend in den Strahlengang 24 eingebracht werden.

Bei dem Ausführungsbeispiel der Fig. 2 gehen von der Halterung 20 Befestigungsarme 26, 28 aus, die außerhalb der Fokalebene enden und als Aufnahme für eine seitlich in die optische Achse 24 hineingeführte Tasterverlängerung 16 dient, die über ein Kupplungsstück

30 mit dem Tastelement 32 verbindbar ist, das über einen stabförmigen Abschnitt 34, der entlang der optischen Achse 24 verläuft, in das eigentliche Tastelement 14 in Form der Kugel übergeht, mittels der die Struktur des Randes der Bohrung 10 bestimmt wird.

Bei der Anordnung gemäß Fig. 3 wird eine L-förmig gebogene Tasterverlängerung 38 von einer von der Halterung 20 ausgehenden Aufnahme 36 gehalten, wobei ein geradlinig verlaufender Endabschnitt 42 der Tasterverlängerung 38 parallel zur optischen Achse 24 verläuft und endseitig in das Tastelement wie Tastkugel 14 übergeht.

Nachdem das Tastelement 14 justiert ist, kann es durch die vorhandene Optik des Koordinatenmessgerätes 22 oder einem entsprechenden Sensor beobachtet werden. Bei Antastung des Randes der Bohrung 12 ändert das Tastelement 14 seine Lage im Kamera- bzw. Sensorfeld. Diese Auslenkung wird durch eine elektronische Bildverarbeitung ausgewertet. Hierdurch wird eine Funktionsweise realisiert, die analog zu einem konventionell messenden Tastsystem wirkt. Dabei kann die Ansteuerung des Koordinatenmessgeräts 22 entsprechend einem konventionell mechanisch messenden Tastsystem erfolgen.

Um das Tastelement 14 optisch zu erfassen, bestehen verschiedene Möglichkeiten, die rein prinzipiell den Fig. 4 bis 6 und 10 und 11 zu entnehmen sind.

So wird nach der Fig. 4 ein Durchlichtverfahren vorgeschlagen, wobei auf dem Sensor- bzw. Kamerafeld der Schatten des Tastelements 14 beobachtet bzw. gemessen wird. Voraussetzung für das der Fig. 4 zu entnehmende Durchlichtverfahren ist, dass die Bohrung 10 durchgehend ist, also das Werkstück 12 vollständig durchsetzt.

Bei dem Ausführungsbeispiel der Fig. 5 wird das Tastelement 14 durch Einspiegelung von Licht entlang des Strahlengangs 24 mit Licht beaufschlagt. Hierzu befindet sich oberhalb des Koordinatenmessgeräts 22 ein Spiegel 42, über den durch das Koordinatenmessgerät 22 und die Halterung 20 hindurch Licht entlang der optischen Achse 24 eingespiegelt wird.

Es wird für die Tasterverlängerung 30 vorzugsweise eine Lichtleitfaser benutzt. Diese bietet

auch den Vorteil, dass das Licht durch diese selbst zu dem Tastelement 14 geführt wird, wie dies anhand der Fig. 6 verdeutlicht wird. Die Lichtquelle selbst ist in den Fig. mit den Bezugszeichen 44 versehen.

Das Tastelement 14 weist in den Ausführungsbeispielen eine volumenmäßig abstrahlende Kugelform auf. Dabei kann das Tastelement 14 mit der Tasterverlängerung 30 z. B. durch Kleben oder Schweißen fest verbunden sein. Aber auch eine auswechselbare Verbindung über eine Kupplung ist möglich.

Ist bei dem Ausführungsbeispiel der Fig. 7 das Tastelement 14 mit dem Ende 40 der Tasterverlängerung 30 verklebt, so kann bei dem Ausführungsbeispiel der Fig. 8 das Tastelement 30, d. h. dessen Endabschnitt 40 selbst als Tastelement ausgebildet sein. Hierzu wird vorzugsweise der Endabschnitt 40 endseitig entsprechend geformt. Es besteht aber auch die Möglichkeit, die endseitige Stirnfläche der Tasterverlängerung 30 mit einer reflektierenden Abdeckung zu versehen, um die Funktion der Zielmarke zu erfüllen.

Anstelle der Beobachtung des Tastelementes 14 selbst kann diesem in fester orstmäßiger Zuordnung eine vorzugsweise ebenfalls kugelförmige Zielmarke 46 zugeordnet sein, die ein Abschnitt der Tasterverlängerung 30 ist oder auf diese aufgesetzt ist, wie dies anhand der Fig. 11 verdeutlicht wird. So weist die Tasterverlängerung 30 endseitig das kugelförmige Tastelement 14 auf. Des Weiteren sind in Abständen zueinander an der Tasterverlängerung 30 kugelförmige Zielmarken 46, 48, 50 angebracht. Somit besteht die Möglichkeit, entweder die Position des Tastelements 14 unmittelbar oder die der diesem eindeutig zugeordneten Zielmarken 46 bzw. 46, 48 bzw. 46, 48, 50 zu beobachten.

Das Tastelement 14 bzw. die Zielmarke 46, 48, 50 kann aus verschiedenen Materialien wie Keramik, Rubin oder Glas bestehen. Ferner kann die optische Qualität der entsprechenden Elemente durch Beschichtungen mit streuenden oder reflektierenden Schichten verbessert werden.

Der Durchmesser der Tasterverlängerung 30 beträgt vorzugsweise weniger als 100 µm.

vorzugsweise einen Durchmesser von 20 μm . Das Tastelement 14 bzw. die Zielmarke 46, 48, 50 weist einen größeren Durchmesser auf, vorzugsweise einen zwischen 1,5- und 3-fach größeren Durchmesser als den der Tasterverlängerung 30 wie Lichtleiter.

In dem Bereich, wo der Mantel der Tasterverlängerung 30 von Licht nicht durchsetzt werden muss, kann eine Oberflächenbeschichtung aus Teflon oder einer sonstigen bruchhemmenden Substanz vorgesehen sein.

Das Bild des Tastelements 14 oder einer dieser zugeordneten Zielmarke 46, 48, 50 kann z. B. auf einem CCD-Feld einer optischen Koordinatenmessmaschine abgebildet werden. Die Verschiebung des Lichtfleckes im CCD-Feld kann mit Subpixelgenauigkeit gemessen werden. Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren sind reproduzierbare Messungen mit einer Genauigkeit im μm -Bereich möglich.

Bei dem Ausführungsbeispiel der Fig. 10 und 11 gelangt ein photogrammetrisches Verfahren zur Anwendung. Von einer gemeinsamen Halterung 20 gehen zwei auf das Tastelement 14 ausgerichtete optische Abbildungssysteme wie Kameras 52, 54 aus. Die auf das Tastelement 14 optisch ausgerichteten Kameras 52, 54 ermöglichen eine räumliche Bestimmung des Tastelements 14 mit üblichen aus der Industriephotogrammetrie bekannten Auswertetechniken. Die Verwendung einer redundanten Anzahl von Kameras (zum Beispiel drei) ermöglicht ein Objekt auch zu messen, wenn eine der Kameras abgeschattet ist. Bei kleinen Bohrungen reicht der Einsatz einer Kamera aus, die so optisch auf das Tastelement 14 ausgerichtet ist. Losgelöst hiervon wird zur Bestimmung der Struktur im Objekt entweder ein aktiv lichtabstrahlendes, lichtreflektierendes oder lichtabschattendes Abtastelement 14 bzw. eine Zielmarke 46, 48, 50 benutzt, wobei vorzugsweise aus der Lichtquelle 44 dem Tastelement 14 bzw. den Zielmarken 46, 48, 50 über die als Lichtleitfaser ausgebildete Tasterverlängerung 30 Licht zugeführt. Alternativ besteht die Möglichkeit, das Licht selbst in der Tasterverlängerung 30 oder in den Zielmarken 46, 48, 50 bzw. dem Tastelement 14 zu erzeugen, in dem diese z. B. elektrisch leuchtende Bausteine wie LEDs enthalten oder solche sind. Mit der erfindungsgemäßen Lehre ergibt sich ein ideal kontrastreiches und ein ideal kreisförmiges Bild des Tastelements 14 bzw. der Zielmarke 46, 48, 50, sofern diese eine Kugelform

aufweisen. Zusätzlich oder alternativ besteht die Möglichkeit, das Tastelement 14 bzw. die Zielmarken 46, 48, 50 fluoreszierend auszuführen, so dass eingestrahltes und abgestrahltes Licht frequenzmäßig getrennt sind, so dass das von dem Tastelement 14 bzw. den Zielmarken 46, 48, 50 erzeugte Bild von der Umgebung getrennt werden kann.

Mit der erfindungsgemäßen Ausbildung eines Koordinatenmessgerätes, mit dem ein Tastelement wie Tastkugel bzw. eine dieser räumlich eindeutig zugeordneten Zielmarke unmittelbar optisch erfasst wird, um aus der direkten optischen Messung des Tastelementes bzw. der Zielmarke die Struktur des Körpers zu bestimmen, lassen sich Strukturen in der Größenordnung von $100\text{ }\mu\text{m}$ und weniger, insbesondere im Bereich bis zu $50\text{ }\mu\text{m}$ bestimmen bei einer Messunsicherheit von $\pm 0,5\text{ }\mu\text{m}$. Mit dem Koordinatenmessgerät können übliche Messvolumen wie zum Beispiel $0,5 \times 0,5 \times 0,5\text{ m}^3$ ausgemessen werden.

In Fig. 12 ist ein Blockschaltbild dargestellt, um entsprechend der erfindungsgemäßen Lehre in einem Koordinatenmessgerät 56 durch unmittelbare optische Messung der Position eines Tastelementes 58 die Struktur eines Objektes zu bestimmen, wobei durch CNC-Steuerung das Objekt von dem Tastelement 58 angetastet werden soll.

Das Koordinatenmessgerät 56 weist einen üblichen Aufbau auf. Beispielfhaft geht das Tastelement 58 von einer Halterung aus, die an einer entlang einer Traverse 60 in X-Richtung verstellbaren Pinole 62 befestigt ist, die ihrerseits in Z-Richtung verstellbar ist. Das Objekt selbst ist auf einem Messtisch 64 befestigt, der in Y-Richtung verfahrbar ist. Tastet das Tastelement 58 das Objekt an, werden aus den der Position des Tastelements 58 entsprechenden Videosignalen mittels einer Bildverarbeitung 66 die Koordinaten X' , Y' bzw. Z' des Tastelements 58 berechnet und einem Messrechner 68 zugeführt und in diesem mit den Koordinatenwerten X, Y, Z des Koordinatenmessgerätes 56 verknüpft, die über einen Zähler 70 bestimmt werden. Aus den so berechneten Werten werden einerseits die Objektgeometrie bestimmt und andererseits über eine CNC-Steuerung 72 der CNC-Lauf des Koordinatenmessgerätes 56 gesteuert.

08.10.99

1

Werth Messtechnik GmbH
Siemensstraße 19
35394 Gießen

Schutzansprüche

Koordinatenmessgerät zur Messung von Strukturen eines Objekts

1. Koordinatenmessgerät zur Messung von Strukturen eines Objekts (12) mit einem ein Tastelement (14) und eine Tastverlängerung (16, 38) umfassenden Taster, einem Sensor zur optischen Bestimmung des Tastelements (14) und/oder zumindest einer diesem unmittelbar zugeordneten Zielmarke, und einer Auswerteeinheit, mit der aus der Position des optischen Sensors zum Koordinatensystem des Koordinatenmessgerätes und der mittels des optischen Sensors unmittelbar gemessenen Position des Tastelements und/oder der Zielmarke die Strukturen berechenbar sind,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t,
dass die Tasterverlängerung (16, 38) biegeelastisch ausgebildet ist.
2. Koordinatenmessgerät nach Anspruch 1,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t,
dass das Tastelement (14) und/oder die Zielmarke (46, 48, 50) als Reflektor ausgebildet ist.
3. Koordinatenmessgerät nach Anspruch 1 oder 2,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t,
dass das Tastelement (14) und/oder die Zielmarke (46, 48, 50) selbststrahlend ausgebildet ist.

1. Oktober 1999-39489A/zi

DE 298 23 884 U1

4. Koordinatenmessgerät nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Tastelement (16) und/oder die Zielmarke (46, 48, 50) ein Strahlung räumlich abstrahlender oder reflektierender Körper wie Kugel oder Zylinder ist.
5. Koordinatenmessgerät nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Tasterverlängerung (38) zumindest abschnittsweise als Lichtleiter ausgebildet ist oder einen solchen umfaßt.
6. Koordinatenmessgerät nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Tasterverlängerung (38, 40) oder zumindest ein Abschnitt von dieser das Tastelement (14) und/oder die Zielmarke (46, 48) ist.
7. Koordinatenmessgerät nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass dem Tastelement (14) mehrere Zielmarken (46, 48) zugeordnet sind, die vorzugsweise von der Tasterverlängerung (30) ausgehen oder Abschnitte von dieser bilden.
8. Koordinatenmessgerät nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Tasterverlängerung (30) L-förmig zur Ausrichtung auf eine optische Achse (24) gebogen ist.
9. Koordinatenmessgerät nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Tasterverlängerung (30) endseitig als Tastelement (14) ausgebildet ist.

10. Koordinatenmessgerät nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Tastelement (14) und/oder die Zielmarke (46, 48, 50) auswechselbar mit der Tasterverlängerung (30) verbunden sind.
11. Koordinatenmessgerät nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Tastelement (14) und/oder die Zielmarke (46, 48, 50) mit der Tasterverlängerung (30) durch Kleben oder Schweißen verbunden sind.
12. Koordinatenmessgerät nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Taster (18) von einer um zumindest 3 Freiheitsgrade, vorzugsweise um 5 Freiheitsgrade justierbaren Halterung (30) vorzugsweise auswechselbar ausgeht.
13. Koordinatenmessgerät nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Taster (18) von einer Halterung (20) ausgeht, die mit dem Sensor eine Einheit bildet bzw. mit dem Sensor verbunden ist.
14. Koordinatenmessgerät nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Taster (18) dem Objekt (12) von dessen sensorzugewandten Seite zuführbar ist.
15. Koordinatenmessgerät nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Tastelement (14) und/oder die Zielmarke (46, 48, 50) ein selbstleuchtendes elektronisches Element wie LED aufweist oder ein solches ist.

16. Koordinatenmessgerät nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Sensor ein Bildverarbeitungssensor ist.
17. Koordinatenmessgerät nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Sensor ein positionsempfindlicher Flächensensor ist.
18. Koordinatenmessgerät nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Durchmesser des Tastelementes (14) in etwa 1- bis 3-fach größer als der der Tastverlängerung (38) ist.
19. Koordinatenmessgerät nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Tastverlängerung (30) endseitig eine Zylinderform aufweist und als Tastelement (14) ausgebildet ist.
20. Koordinatenmessgerät nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Tasterverlängerung (30) zur Ausbildung des Tastelementes sphärisch ver-rundet ist.

08.10.99

Fig.1:

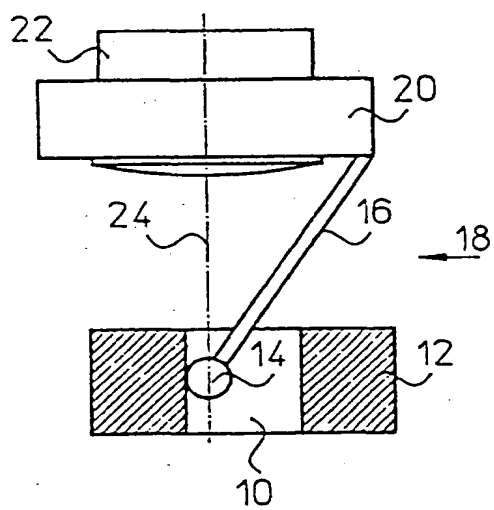
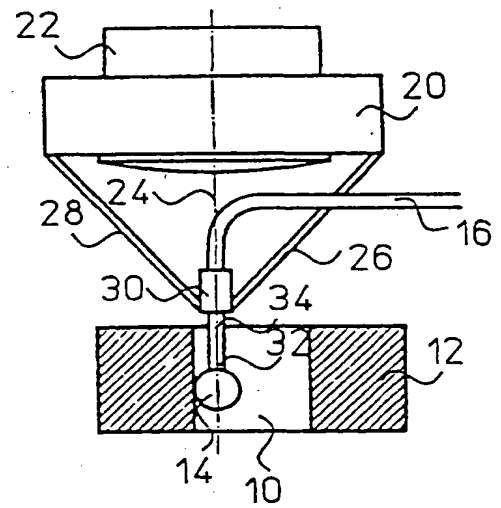


Fig.2:



DE 298 23 884 U1

08.10.99

Fig.3:

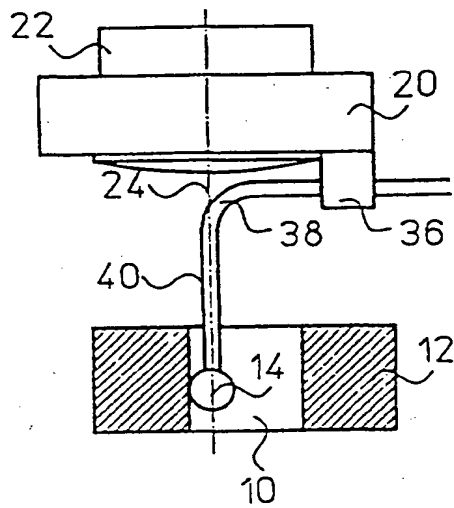
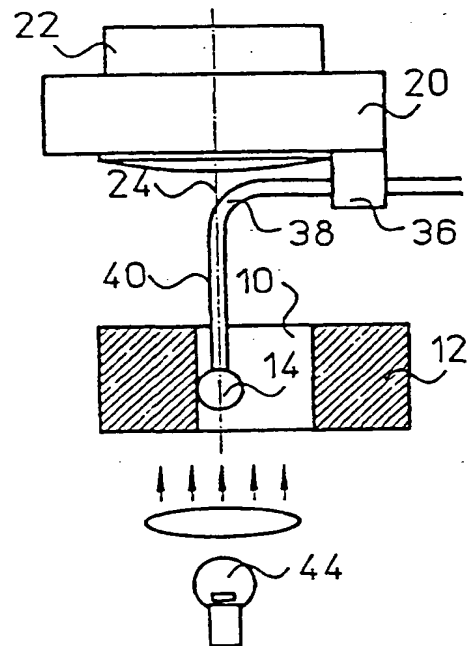


Fig.4:



DE 298 23 884 U1

Fig.5:

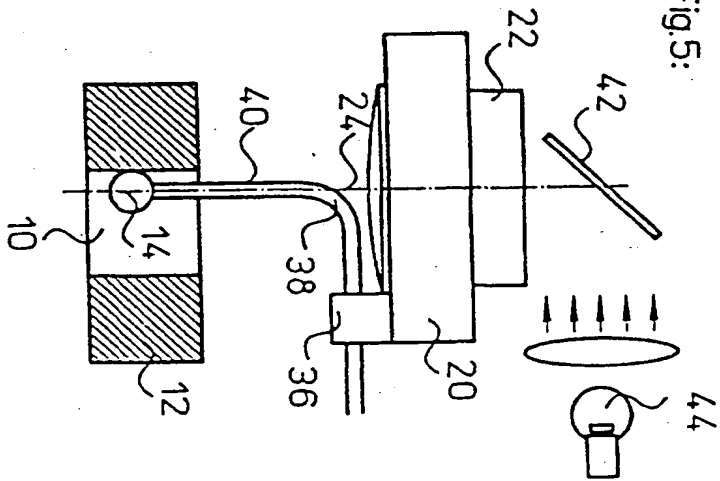
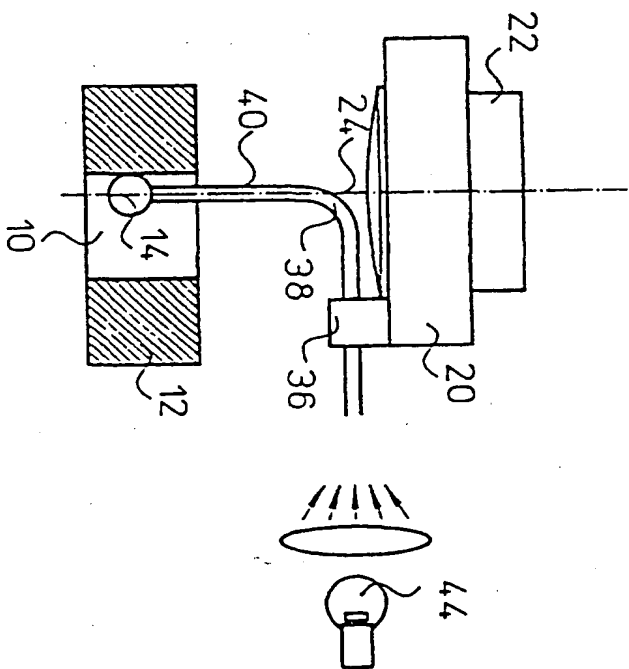


Fig.6:



08.10.99

Fig. 7:

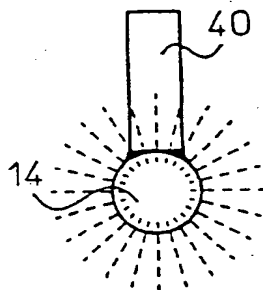


Fig. 8:

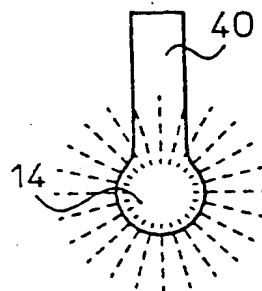
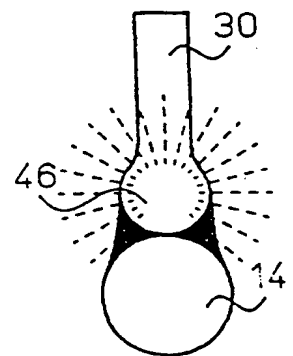


Fig. 9:



DE 298 23 884 U1

08.10.99

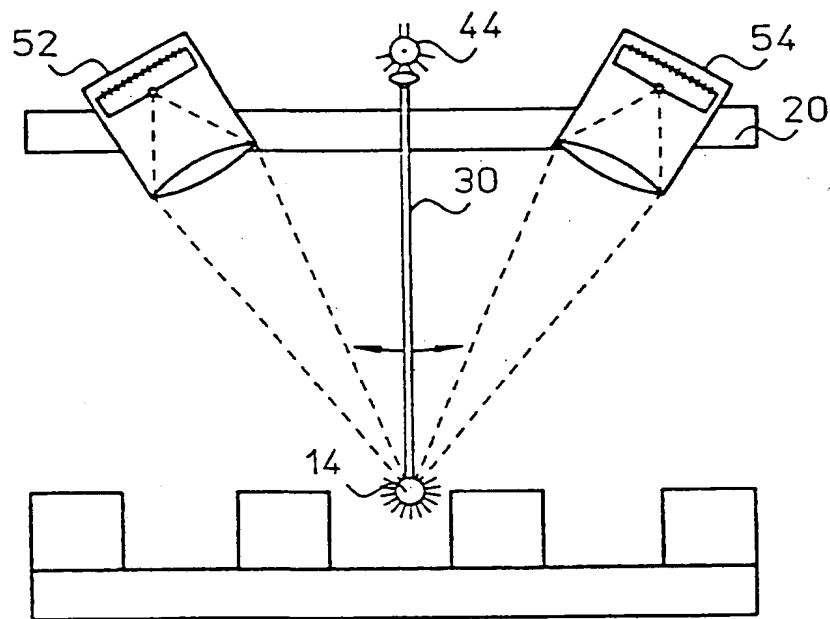


Fig. 10

DE 298 23 884 U1

08.10.99

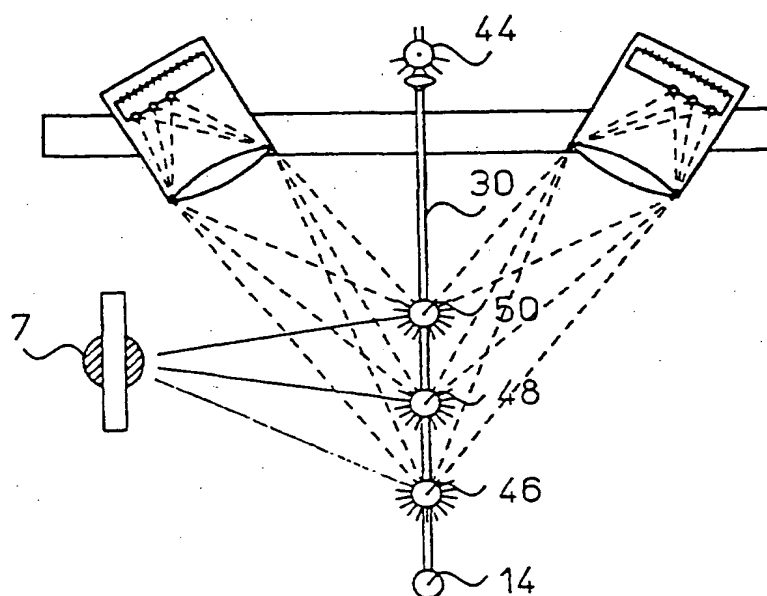


Fig. 11

DE 298 23 884 U1

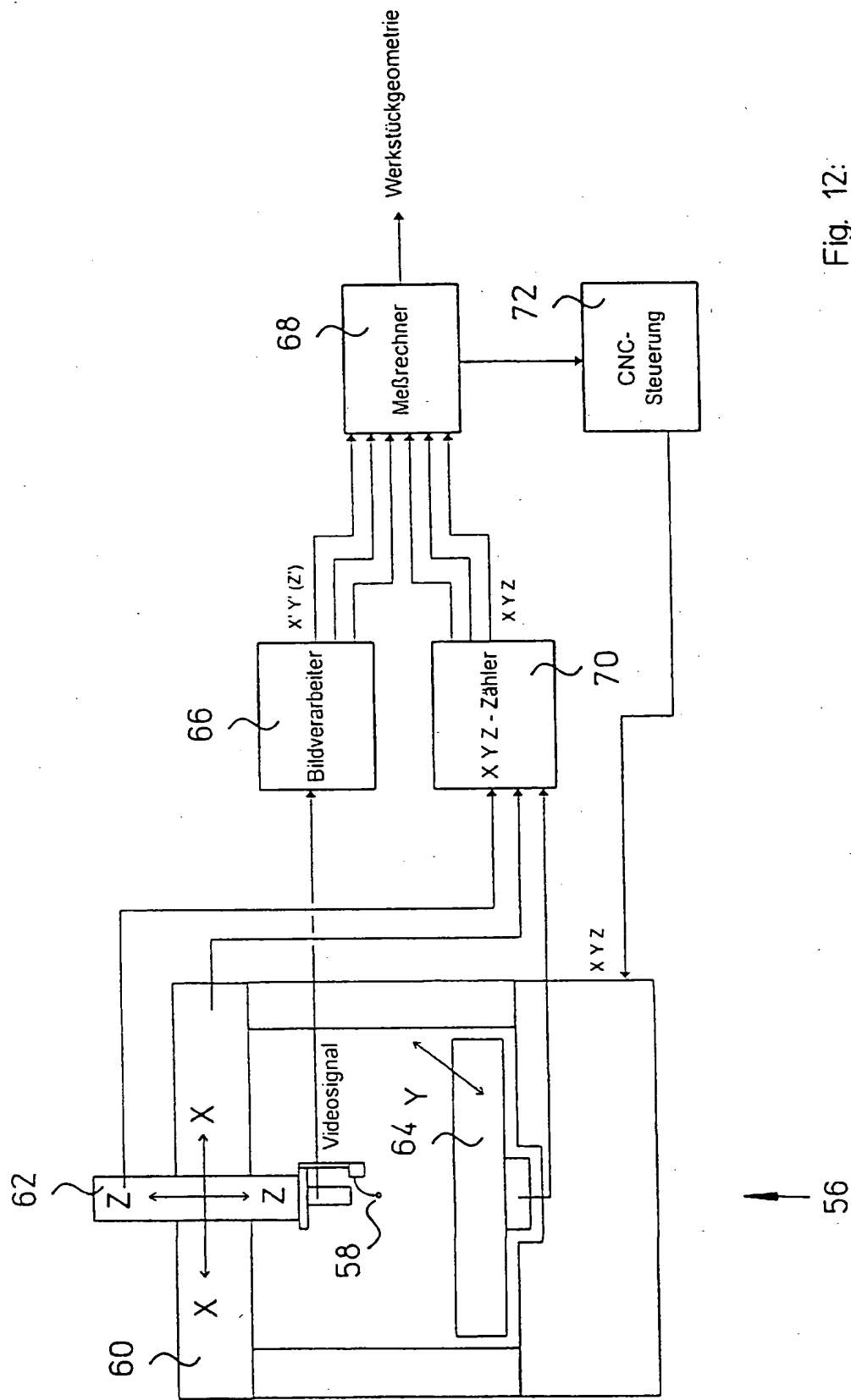


Fig. 12:

DE 298 23 884 U1

Werth Messtechnik GmbH
Siemensstraße 19
35394 Gießen

Description

5 Coordinate measuring machine for measuring structures
of an object

10 The invention relates to a coordinate measuring machine
for measuring structures of an object, having a probe
comprising a feeler element and a probe extension, the
coordinate measuring machine comprising a sensor for
15 optically determining the feeler element and/or at
least one target, assigned directly thereto, and an
evaluation unit with the aid of which it is possible to
calculate the structure from the position of the
optical sensor relative to the coordinate system of the
coordinate measuring machine and the position, measured
15 directly by means of the optical sensor, of the feeler
element and/or the target.

20 In order to measure structures of an object, use is
made of coordinate measuring machines with electro-
mechanically operating probes with the aid of which the
structural layout is determined indirectly, that is to
say the position of the tracer element (ball) is
25 transmitted via a feeler pin. Deformations thereby
occurring in the feeler pin in conjunction with the
frictional forces acting lead to falsification of the
measurement results. Furthermore, the considerable
force transmission leads to measuring forces which are
30 typically greater than 10 N. The geometrical
configuration of such sensing systems limits the latter
to ball diameters of greater than 0.3 mm. The three-
dimensional measurement of ball structures in the

region of a few tenths of millimetres, and the tracing of easily deformable test pieces are therefore problematical or impossible. Measuring uncertainties which are typically greater than 1 μm arise owing to
5 the incompletely known error-inducing influences through deformation by feeler pin and feeler element, as well as the unknown tracing forces, for example, because of stick/slip effects.

10 An appropriate mechanically tracing coordinate measuring machine is disclosed, for example, in DE 43 27 250 A1. In this case, the mechanical tracing operation can be visually inspected with the aid of a
15 monitor by observing the feeler head using a video camera. If appropriate, the feeler head can be designed in this case in the form of a so-called quartz crystal oscillator probe which is damped upon contact with the
20 workpiece surface. It is thereby possible to use a video camera to follow, on the monitor, the position of the feeler ball relative to the workpiece or to the bore to be measured there, and manually to observe and to control the tracing operation upon insertion into
25 the bore. The actual measurement is performed, in turn, electromechanically, and so the abovementioned disadvantages remain.

An optical observation of a feeler head in the case of a coordinate measuring machine is also disclosed in DE 35 02 388 A1.

30

In order to determine the exact position of the machine axes of a coordinate measuring machine, according to DE 43 12 579 A1 at least six sensors are fitted on a quill and/or a measuring head, in order to be able to
35 determine the distance from a reference surface. No further detail will be given here concerning the tracing of the object geometries, but a contactless method will be described as a substitute for classical incremental displacement measurement systems.

US 4,972,597 describes a coordinate measuring machine having a probe whose probe extension is biased in its position by means of a spring. A section, running in a housing, of the probe extension has two mutually spaced, light-emitting elements for the purpose of determining the position of the probe extension by means of a sensor element and thus, indirectly, that of a feeler element arranged at the outer end of the probe extension.

The optical sensor system here likewise replaces the classical displacement measurement systems of electro-mechanical sensing systems. The actual tracing operation is performed, in turn, by means of force transmission from feeler element to the feeler pin via spring elements to the sensor. The abovementioned problems associated with sagging and tracing force once again remain. This is an indirect method.

Known for the purpose of measuring large bodies such as aircraft parts are feeler pins having light sources or reflecting targets whose positions are detected optically (DE 36 29 689 A1, DE 26 05 772 A1, DE 40 02 043 C2). The probes themselves are moved by hand or by means of a robot along the surface of the body to be measured.

In this method, the position of the feeler element is determined in its location stereoscopically by triangulation or the like. The resolution of the overall measuring system is therefore directly limited by the sensor resolution. The use of such systems can therefore come into consideration only in the case of relatively low-level performance based on the relationship between the measuring range and accuracy. In practice, it is limited to measuring large parts.

WO 93/07443 discloses the use of optical sensors to determine structures of an object indirectly, a rigid

probe having at least three targets which are detected with the aid of an angle sensor in order to determine a coordinate measuring point.

5 Another possibility of measuring the structures of a body optically is described in WO 88/07656 by means of an interferometer system. The system comprises a probe with a rod-shaped probe extension at whose end there is arranged a ball which is brought into contact with the
10 body whose position is to be determined. The probe extension projects from a plate-shaped holder which can be adjusted in three directions relative to the object. Projecting from the holders are retroreflectors to which radiation emitted by interferometers is applied. The
15 reflected radiation is detected by the interferometers in order thus to be able to measure the beam path between the interferometers and the retroreflectors so as to determine the position of the object.

20 The US journal: Quality, April 1998, pages 20 ff discloses the proposal to measure structures of an object by means of a feeler element by determining the position thereof with the aid of an optical sensor. It is mandatory in this case for the probe to be sharply
25 imaged.

It is known from the US journal: American Machinist, April 1994, pages 29-32 to use various measuring systems in order to determine the geometry of a workpiece. It is
30 a case here of the possibility of, on the one hand, measuring a surface with a video camera and, on the other hand, carrying out a tactile measurement, these being treated as alternatives.

35 A probe is employed in the US journal: Tooling & Production, October 1990, pages 76 - 78 either for purely tactile, that is to say mechanical measurement, or for optical detection in order to determine structures. It is necessary in this case for the probe, which is brought

into contact with the body, likewise always to be capable of being imaged in an optically clear manner.

5 In the US journal: Plastics World, August 1989, No. 8, there is an illustration of a feeler element whose position is detected optically. As shown by the illustration, use is made of a rigid probe which does not permit the measurement of very small dimensions or of materials which are very soft and thus should not have
10 high tracing forces applied to them, since, otherwise, the geometry would be falsified. A corresponding disclosure follows from the US journal: Quality, January 1990, as shown by the illustration.

15 The company publication of Carl Zeiss Jena, entitled Technische Messgeräte, pages 54, 55 discloses a bore measuring microscope in the case of which, using the transmitted light method alone, the distance between two diametrically situated points of a bore to be measured is
20 determined under microscopic observation.

The present invention is based on the problem of developing a device of the type mentioned at the beginning such that arbitrary structures can be
25 determined with a high measuring accuracy, the aim being to determine precisely the position of the feeler element to be brought into contact with the object. The aim, in particular, is to provide the possibility of measuring bores, holes, undercuts or the like, the aim also being
30 to determine structures in the range between 50 and 100 μm with a measuring accuracy of at least $\pm 0.5 \mu\text{m}$.

This problem is solved according to the invention essentially by the probe extension being of flexible
35 design.

In this case, the feeler element and/or the at least one target are/is of self-radiating design and/or designed as a reflector.

The feeler element and/or the target should preferably be designed as a body such as a ball or cylinder, which emits or reflects radiation in three dimensions.

5

According to the invention, the feeler element is connected to the probe extension as a shaft which is of flexible design. Connection can be performed by bonding, welding or other suitable types of connection.

10

Again, the feeler element and/or the target can be a section of the probe extension itself. In particular, the probe extension or the shaft is designed as an optical conductor, or comprises such, in order to feed the required light via the latter to the feeler element

15

or the target.

The shaft itself can be designed as a probe at the end, or comprise such. In particular, the feeler element and/or the target should be connected exchangeably to the probe extension as a shaft.

20

Furthermore, it is provided that the probe projects from a holder which can be adjusted in five degrees of freedom. The holder itself can, in turn, form a unit with the sensor or be connected to the sensor.

25

It is also possible for the feeler element and/or the target to be designed as a self-luminous electronic element such as an LED or to comprise such.

30

According to the invention, a sensing system for coordinate measuring machines is proposed which combines the advantages of optical and mechanical sensing systems and which can be used, in particular, when mechanically measuring very small structures in which conventional sensing systems can no longer be used. However, this also enables optical measuring instruments to be equipped and converted in a simple manner for mechanical measuring tasks.

35

Thus, it is provided to use a sensor such as an electronic camera to determine the position of a feeler element or tracer element or a target assigned thereto, after the said element has been brought into mechanical contact with a workpiece. Because the position of either the feeler element itself or the target, which is directly connected to the feeler element, is measured, deformations of a shaft holding the probe do not influence the measuring signal. There is no need during measurement to take account of the elastic behaviour of the shaft, nor can the plastic deformations, instances of hysteresis and drift phenomena of the mechanical coupling between the feeler element and the sensor exert an influence on the measuring accuracy. Reflections in the direction perpendicular to the sensor and camera axis can be determined directly by displacing the image in a sensor field, in particular an electronic camera. The evaluation of the image can be performed by an image processing system already installed in a coordinate measuring machine. A sensing system which operates in two dimensions and can very easily be coupled to an optical evaluation unit is thereby implemented.

There are several possibilities according to the invention for sensing the deflection in the direction of the optical sensor and camera axis, for example, inter alia:

1. The deflection of the feeler element in the direction of the sensor axis (camera axis) is measured by a focusing system in a way already known in optical coordinate measuring technology when focusing on the workpiece. The contrast function of the image is evaluated thereby in the electronic camera.

2. The deflection of the feeler element in the direction of the sensor and camera axis is measured by evaluating the image size of a target, thus the change in the diameter in the case of a circular or annular target, for example. This effect is due to the ray-optic imaging and can be specifically optimized by the configuration of the optical unit. In coordinate measuring technology, use is frequently made of so-called telecentric objectives which are intended to implement as constant a magnification as possible even in the case of a deviation from the focal plane. This is achieved by displacing the optical entrance pupil to "infinity". An optimization with a reversed sign would be useful for the abovedescribed evaluation: even a small deviation from the focal plane is intended to result in a clear change in the linear magnification. This is to be achieved, for example, by the displacement of the optical entrance pupil to the level of the object-side focal point. A large depth of field should, if possible, be implemented in this case; it permits contrasting imaging of the target over a relatively wide distance range. An ideal optical unit for the abovedescribed application in the sense of its imaging characteristics would be, for example, a pinhole camera. Changes in size resulting from blurring can be minimized by the use of an annular target: to a first approximation, the mean ring diameter does not change owing to blurring, only the ring width does.
3. In the case of a third possibility, as well, the change in size of the target is evaluated, but it is that which results from the combination of ray-optic change in size and the apparent magnification from blurred edges. By contrast with the evaluation of the blurring function, this

method utilizes the fact that the actual size of the target is invariable.

According to the invention, the direct measurement of the position of a feeler element is used to determine the structure of objects. Many different physical principles come into consideration in principle for this direct measurement. Since the measurement of the deflection of the feeler element must be performed very accurately in a wide measuring range in space in order to permit continuous scanning operations, for example, and in order to pick up a large overtravel during object tracing (for example, for reasons of safety, but also in order to reduce the outlay for accurate positioning), it is also possible to use a photogrammetric method. Two camera systems with axes inclined towards one another could be used. The evaluation techniques known from industrial photogrammetry can essentially be used.

All measurement tasks in which the feeler element does not "disappear" behind undercuts, can be performed by two cameras "looking", for example, in the longitudinal direction of the feeler element, or in a fashion inclined to the ends, facing the latter, of a probe extension such as a shaft. The use of a redundant number of cameras (for example, three) also permits measurements to be made on objects having steep contours. For measurement in small bores, it is possible to use a camera which is arranged such that it "looks" at the feeler element in the longitudinal direction of the feeler element or the probe extension. A single camera, which is aligned in the longitudinal direction of the probe extension, such as a shaft, holding the feeler element is sufficient in principle for two-dimensional measurements (that is to say for measurements in bores, for example).

No feeler element actively emitting light, or any other active target is mandatory for using the probe in a way according to the invention. Particularly high accuracies are achieved with light-emitting feeler balls or other light-emitting targets on the probe extension. The light from a light source is fed in this case to the feeler element, such as a feeler ball, or other targets of the probe extension via, for example, an optical fibre which can itself constitute the probe shaft or the probe extension. Again, the light can be generated in the shaft or in the targets by virtue of the fact that the latter include LEDs, for example. The reason for these modes of construction is that electronic imaging systems such as photogrammetric systems, in particular those for microscopically small structures, require a high light intensity. If this light is fed specifically directly to the feeler element, the necessary light power is reduced substantially, and thus so is the thermal loading of the object during measurement. The use of balls as the feeler element results in an ideally contrasting and ideally circular image of the feeler ball from all directions of view. This holds, in particular, in the case of the use of a volume scattering ball. Defects owing to images of structures of the object itself are avoided, since the object itself is brightly illuminated only in the direct vicinity of the feeler ball. However, in this case, the image of the feeler ball produced by reflections at the object will virtually always appear less bright than the feeler ball itself. Defects can therefore be corrected without difficulty. These advantages are not necessarily possessed by externally illuminated targets. It is also possible for the targets to be fluorescent such that irradiated and emitted light are separated in terms of frequency, and it is thereby likewise possible to isolate the targets from the surroundings more clearly in the image. The same considerations hold for the feeler element itself.

In order to carry out measurements even in small bores or on very steep structures, when, because of vignetting, the feeler element itself cannot be
5 detected, or not by a plurality of cameras, it is possible, according to the invention, to detect the position, the orientation and the curvature of the optical fibres in the visible sub-regions in a sensory fashion, such as photogrammetrically. It is possible
10 therefrom to calculate the position of the feeler element, for example, via a formulation of the fibre bending in the form of a parabola with a linear or quadratic term. The measurement in the case of different overtravels (more or less internally
15 positioned in the object) and, subsequently, averaging of the position of the feeler element, increases the measuring accuracy. The optical, for example, photogrammetric measurement of the fibre is facilitated by a uniform emission of light by the fibre which can
20 be improved by using volume scattering fibre material, the application of a diffusely emitting layer on the fibre surface, or some other suitable selection of the fibre composition and fibre geometry (for example, production from material having a relatively low
25 refractive index).

It is also possible, according to the invention, to fit further illuminated balls or other targets on the optical fibre, to detect the position of these targets
30 photogrammetrically, in particular, and to calculate the position of the feeler element correspondingly. Here, balls constitute comparatively ideal, unique targets, of which there are otherwise none on the fibre. Effective coupling of light into the balls is
35 achieved by disturbing the optical conductor characteristics of the shaft, for example, by pushing the drilled-through volume scattering balls onto the shaft, that is to say the probe extension, and bonding them thereto. Again, the volume scattering balls can be

bonded laterally onto the shaft, it also being possible to couple light in, assuming that the shaft guides light up to its surface and thus has no cladding at the bonding site. Particularly high accuracy is achieved
5 when the position of the feeler element is detected experimentally (calibrated) as a function of the fibre position and fibre curvature (zones of the fibre at some distance from the feeler element). Here, again, it is also possible to measure targets mounted along the
10 fibre instead of measuring the fibre itself.

The calibration can be performed, for example, by tracing a ball from different directions and with different forces (more or less "internally positioned"
15 in the object), or it is performed by known relative positioning of the sensing system with reference to the clamped feeler ball.

The separation of the elements, such as feeler ball and
20 targets, comprising feeler elements, additionally reduces the probability of a disturbance to the measurement of the position of the feeler element by reflections of the targets on the object surface.

25 It is possible, according to the invention, for a plurality of probes to be used consecutively, for example, various feeler elements or feeler pins can be swivelled into the field of view by means of a simple changing device (for example, a turret with a plurality
30 of probes). It is also possible, according to the invention, to make simultaneous use of a plurality of feeler elements. The identification of the active feeler element or feeler pin is possible, for example, by switching off the illumination of the non-active
35 feeler pins or via some other coding such as, for example, by means of target size, colour of the light, target position in the probe coordinate system, modulation of the light and/or with the aid of applied patterns. Feeler pin measurements such as are customary

in classical coordinate measurement technology are not mandatory in the case of the probes according to the invention, since, the position of the feeler ball and the diameter of the feeler ball can be detected
5 photogrammetrically with frequently sufficient accuracy.

Measurement with the aid of small feeler elements frequently entails a high number of destroyed feeler
10 pins (feeler element, probe extension). In the case of the system according to the invention, the feeler pins are inexpensive and simple to exchange. Expensive sensors and the movement axes are not generally damaged or changed by collisions, since the distance from the
15 feeler element can be quite large. For example, the shaft length can be greater than the movement range of the system, a collision thereby being impossible. A large probe and ball deflection relative to the shaft length is possible without difficulty. This results in
20 a high inherent safety of the system and good scannability. Again, high tracing speeds are possible without damage to the object surface.

Photogrammetric systems or other known optically
25 operating sensor systems permit a mathematical alignment of the object before the actual start of measurement on the basis of the image information via the objective. The object can thus be traced with pinpoint accuracy during the actual tactile
30 measurement.

With this system there are two types of elastic influences which can lead to measurement deviations.

- 35 1. The flexibility of the object itself (over relatively large ranges); influences from this can be extrapolated to zero by measuring with at least two scanning forces,

2. the local flexibility owing to the Hertz pressure between ball and object surface; these effects can be excluded if required (that is to say, in the case of high-precision measurements or of flexible objects) by measuring with at least two different scanning forces and extrapolation to the fictitious "zero" scanning force.

The extrapolation to "zero" force in the second case is possible because the Hertz deformation is equal to a constant multiplied by the (tracing force)^{2/3}:

$$D = K \cdot F^{2/3}$$

where:

D: Deformation at the point of contact between object and feeler ball

F: Force (for example a magnitude proportional to the tracing force)

K: Constant

$$D_1 = K \cdot F_1^{2/3}$$

$$D_2 = K \cdot F_2^{2/3}$$

$$D_1 - D_2 = K \cdot (F_1^{2/3} - F_2^{2/3}).$$

25

This yields the value of K with the difference ($D_1 - D_2$) known from the measurement, and the known F_1 and F_2 . The flattenings D_1 and D_2 with reference to the tracing with "zero" force can now be calculated. The force-proportional values are, for example, the movement paths calculated from the first object contact. Alternatively, these can also be measured with the aid of force sensors. A force sensor can be, for example, the fibre itself if its curvature is measured photogrammetrically or with the aid of changes in the light reflected/back-scattered internally relative to the light source, or in the emitted light. It is sensible to carry out the measurement with the aid of a plurality of tracing forces for all high-precision

measurement tasks, since the effective radii at the point of contact between the object and feeler element can vary greatly owing to local corrugations and rough areas.

5

When the Hertz and linear elasticity are of the same order of magnitude, it is necessary to trace with the aid of at least three forces, and both the linear and the Hertz elasticity constant must be determined in order to be able to extrapolate to the fictitious "zero" force.

10

Should the deviations from the ideal spherical shape not be negligible when small balls are used as the probe with diameters of less than 0.1 mm, it can be necessary to correct the tracing point coordinates as a function of direction. Two methods come into consideration for detecting the correction values:

15

20 1. Measuring the deviations of the feeler element from the spherical shape, doing so independently of the sensing system with the aid of separate measuring instruments, and

25 2. measuring deviations of the feeler element from the spherical shape, doing so by measuring a reference ball with the aid of the sensing system itself.

30 It is also possible, in principle, to select a different geometrical shape for the feeler elements than that of a ball, for example, a cylinder which can constitute the fibre itself, or the rounded end of the fibre itself, as the probe extension.

35

Since the feeler element (for example a ball) is completely imaged to a greater or lesser extent depending on the direction of view, and since dirt also has a greatly disturbing effect, it is sensible to

determine the position of the feeler element with the aid of so-called robust compensation algorithms. These algorithms include, for example, the minimization of the sum of the absolute deviations (so-called L1 norm).

5

Previously outlined correction methods are required, however, only in extreme cases without thereby fundamentally impairing the teaching according to the invention.

10

In principle, the feeler element, the targets and the shaft can be illuminated not only from within through the shaft, but also from outside by means of suitable illuminating devices.

15

A variant is also available here in which the feeler element and the targets are retroreflectors (triple reflectors, cats' eyes, reflecting balls) and are externally illuminated from the direction of view of the camera.

20

The probe according to the invention is not limited in principle to specific overall sizes of the measurement objects and of the feeler element itself. It can also be used to measure one-, two- and also three-dimensional structures. In particular, the probe extension can be designed as an optical conductor and have a diameter of 20 μm . The diameter of the feeler element as feeler ball should then preferably be 50 μm .

30

It is provided, in particular, that the diameter of the feeler element is approximately one to three times greater than that of the probe extension.

35

In order to increase the ultimate strength of the probe extension, given the use of optical conductors as the material, these can have a surface coating such as Teflon or some other rupture-inhibiting substance. A casing can be formed by sputtering, for example.

The spatial position of the feeler element can be determined by means of a two-dimensional measuring system whenever the feeler element is assigned at least
5 three targets whose images are evaluated in order to determine the spatial position of the feeler element.

The invention also permits a scanning tracing method for determining workpiece geometries. In particular,
10 the images to be evaluated can be delimited by a position-sensitive planar sensor.

The following advantages, inter alia, are obtained with the teaching of the invention by contrast with sensing
15 systems which measure purely mechanically:

- The measurement result is not affected by elastic and plastic influences such as creep phenomena of the mechanical holder and of the tracing shaft.
20
- Very low tracing forces can be implemented ($< 1 \text{ N}$).
- There is no need for precision mechanics.
25
- Very small feeler elements and shaft diameters can be implemented.
- The positioning of the sensing system can be optimally monitored by the operator using the optical system.
30
- The system can be fitted directly on to the existing optical system of a coordinate measuring machine, and the image signal can be evaluated using an image processor provided.
35

- Low equipment complexity resulting from the adaptation to existing optical coordinate measuring machines.

5 The following advantages, inter alia, are obtained by contrast with sensing systems which measure purely optically:

10 - The actual mechanical variables are measured. The measurement result is not affected by properties of the surface such as colour and reflectance behaviour.

15 - Measurements can be made on three-dimensional structures which are not accessible to purely optical systems. Thus, for example, the diameter and the deviation in shape of a bore can be detected at different levels of section.

20 The feeler element and/or the at least one target can be brought for measurement purposes from the region of the optical sensor into the position to be measured.

25 In other words, the probe is fed to the object from the side of the latter facing the sensor. The probe and sensor can, in this case be adjusted as a unit inside a coordinate measuring machine, and their common position can be measured with high precision. Consequently, a coupled movement is performed which ensures low
30 uncertainty for the results. In particular, here, the position of the feeler element and/or the at least one target is determined with the sensor by means of radiation which is being reflected and/or penetrating the object and/or is emitted by the feeler element or
35 the target.

According to the invention, the position of the feeler element, which is due to contact with the object, is determined optically in order to measure the profile of

a structure directly from the position of the feeler element itself or a target. In this case, the deflection of the feeler element can be detected by displacing the image on a sensor field of an electronic image processing system with an electronic camera. It is also possible to determine the deflection of the feeler element by evaluating a contrast function of the image by means of an electronic image processing system. A further possibility for determining any deflection consists in determining the latter from a change in size of the image of a target, from which the ray-optic relationship between object distance and magnification results. Again, the deflection of the feeler element can be determined by apparent change in size of a target which results from the loss in contrast owing to defocusing. Here, the deflection is fundamentally determined perpendicular to the optical axis of the electronic camera. Alternatively, the position of the feeler element or the at least one target assigned thereto can be determined by means of a photogrammatic system. Given the presence of a plurality of targets, their positions can be detected optically and the position of the feeler element can then be calculated, since there is a unique fixed relationship between the said feeler element and the targets.

In a departure from the previously known prior art, direct measurement of the position of the feeler element or the target assigned thereto is carried out according to the invention in order to determine the structure of an object. The feeler element and target in this case have a unique spatial assignment in such a way that no relative movement with respect to one another occurs, that is to say small distances are maintained. It is thereby of no importance whether the probe extension from which the target and the probe element project is deformed during the measurement operation since an indirect measurement of the feeler

element or the target is not carried out - as provided in the prior art - but a direct measurement thereof is performed. The method according to the invention can be used to measure holes, bores, depressions, undercuts or other structures with an extent in the range of at least 50-100 μm with a measurement accuracy of at least $\pm 0.5 \mu\text{m}$. This makes it possible to carry out three-dimensional measurements of very small structures, a requirement which has long existed for example in medical technology for minimally invasive surgery, in the field of microsensors or automotive technology to the extent, for example, that injection nozzles are concerned, without the possibility having existed for satisfying it. The direct measurement of the position of the feeler element and of the target, which is uniquely assigned to the said position and cannot be shifted relative to one another, yields a direct mechanical and optical measuring method with the aid of a coordinate measuring machine which operates with high precision and does not lead to falsifications of measurement results even if the probe extension should be deformed during the measurement operation.

Further details, advantages and features of the invention are yielded not only from the claims and the features to be gathered therefrom - on their own and/or in combination - but also from the description below of preferred exemplary embodiments to be gathered from the drawing, in which:

Figure 1 shows an embodiment of an arrangement for measuring structures of an object,

Figure 2 shows a second embodiment of an arrangement for measuring structures of an object,

Figure 3 shows a third embodiment of an arrangement for measuring structures of an object,

- Figure 4 shows a fourth embodiment of an arrangement for measuring structures of an object,
- 5 Figure 5 shows a fifth embodiment of an arrangement for measuring structures of an object,
- Figure 6 shows a sixth embodiment of an arrangement for measuring structures of an object,
- 10 Figure 7 shows a detail of a first embodiment of a probe,
- Figure 8 shows a detail of a second embodiment of a probe,
- 15 Figure 9 shows a detail of a third embodiment of a probe,
- Figure 10 shows a seventh embodiment of an arrangement for measuring structures of an object,
- 20 Figure 11 shows an eighth embodiment of an arrangement for measuring structures of an object, and
- 25 Figure 12 shows a block diagram.

The figures, in which identical elements are in principle provided with identical reference numerals, show mainly the principle of various embodiments of arrangements for measuring structures of an object by means of a probe assigned to a coordinate measuring machine. As an exemplary embodiment, the structure of a bore 10 in an object 12 is to be determined. The edge of the bore 10 is traced by a feeler element 14 which, for its part, projects from a probe extension 16, which together form a probe 18.

30

35

The probe 18 projects from a holder 20 which can be adjusted by at least three degrees of freedom, preferably by 5 degrees of freedom. An optical system of a coordinate measuring machine 22 is preferably
5 mounted on the holder 20 itself. Another type of connection is likewise possible. However, what is decisive is that the optical system or a sensor of the coordinate measuring machine 22 can be adjusted in the X-, Y- and Z-directions as a unit with the feeler
10 element 14. Independently thereof, the feeler element 14 is adjusted relative to the optical axis 24 and to the focal plane. There are various possibilities here for positioning the feeler element 14, that is to say, in the exemplary embodiment, a feeler ball at the point
15 of intersection of the optical axis 24 with the focal plane. Thus, according to the exemplary embodiment of Figure 1, the probe extension 16 can be introduced into the beam path 24 laterally starting from the holder 20.

20 Projecting from the holder 20 in the exemplary embodiment of Figure 2 are fastening arms 26, 28 which end outside the focal plane and serve as receptacle for a probe extension 16 which is guided laterally into the optical axis 24 and can be connected via a coupling
25 piece 30 to the feeler element 32, which merges via a bar-shaped section 34, which runs along the optical axis 24, linked to the actual feeler element 14 in the form of the ball by means of which the structure of the edge of the bore 10 is determined.

30

In the arrangement in accordance with Figure 3, a probe extension 28 bent in an L-shaped fashion is held by a receptacle 36 projecting from the holder 20, a rectilinear running end section 42 of the probe
35 extension 38 running parallel to the optical axis 24 and merging at the end with the feeler element as feeler ball 14.

After the feeler element 14 is adjusted, it can be observed by means of the existing optical system of the coordinate measuring machine 22, or by an appropriate sensor. During tracing of the edge of the bore 12, the
5 feeler element 14 changes its position in the camera field or sensor field. This deflection is evaluated by an electronic image processing system. As a result, a mode of operation is implemented which acts in a similar way to a conventionally measuring sensing
10 system. In this case, the coordinate measuring machine 22 can be driven in a way corresponding to a conventionally mechanically measuring sensing system.

Various possibilities exist for detecting the feeler
15 element 14 optically, and these can be seen solely in principle in Figures 4 to 6 and 10 and 11.

Thus, Figure 4 proposes a transmitted light method, in which the shadow of the feeler element 14 on the sensor
20 field or camera field is observed and/or measured. It is a precondition for the transmitted light method shown in Figure 4 that the bore 10 is continuous, that is to say completely penetrates the workpiece 12.

25 In the exemplary embodiment of Figure 5, light is applied to the feeler element 14 by reflecting light in along the beam path 24. For this purpose, located above the coordinate measuring machine 22 there is a mirror
42 via which light is reflected in through the
30 coordinate measuring machine 22 and the holder 20 along the optical axis 24.

An optical fibre is preferably used for the probe
extension 30. This also offers the advantage that the
35 light is guided through the fibre itself to the feeler element 14, as is illustrated with the aid of Figure 6. The light source itself is provided in the figure with the reference numeral 44.

In the exemplary embodiments, the feeler element 14 has a spherical shape emitting volumetrically. Here, the feeler element 14 can be permanently connected to the probe extension 30, for example by bonding or welding.
5 However, an exchangeable connection via a coupling is also possible.

If the feeler element 14 is bonded to the end 40 of the probe extension 30 in the exemplary embodiment of
10 Figure 7, the feeler element 30, that is to say the end section 40 thereof can itself be designed as feeler element in the exemplary embodiment of Figure 8. For this purpose, the end section 40 is preferably appropriately shaped at the end. However, it is also
15 possible to provide the end face of the probe extension 30 with a reflecting cover in order to fulfil the function of the target.

Instead of observing the feeler element 14 itself, the
20 latter can be assigned a preferably likewise spherical target 46 in a permanent assignment in terms of location, which target is a section of the probe extension 30 or is mounted thereon, as is illustrated with the aid of Figure 11. Thus, the probe extension 30
25 has the spherical feeler element 14 at the end. Moreover, spherical targets 46, 48, 50 are fitted at spacings from one another on the probe extension 30. It is therefore possible to observe either the position of the feeler element 40 directly, or that of the targets
30 46 or 46, 48 or 46, 48, 50 uniquely assigned to said feeler element.

The feeler element 14 or the target 46, 48, 50 can consist of various materials such as ceramic, ruby or
35 glass. Furthermore, the optical quality of the corresponding elements can be improved by coating with scattering or reflecting layers.

The diameter of the probe extension 30 is preferably less than 100 μm , preferably a diameter of 20 μm . The feeler element 14 or the target 46, 48, 50 has a larger diameter, preferably a diameter between 1.5 and 3 times as large, than that of the probe extension 30 as optical conductor.

A surface coating made from Teflon or some other rupture-inhibiting substance can be provided in the region where the coating of the probe extension 30 must not be penetrated by light.

The image of the feeler element 14 or of a target 46, 48, 50 assigned thereto can be projected, for example, on a CCD array of an optical coordinate measuring machine. The displacement of the light patch in the CCD array can be measured with sub-pixel accuracy. Reproducible measurements with an accuracy in the μm range are possible with the method according to the invention.

A photogrammetric method comes into application in the exemplary embodiment of Figures 10 and 11. Two optical imaging systems, such as cameras 52, 54, aligned with the feeler element 14 project from a common holder 20. The cameras 52, 54, optically aligned with the feeler element 14, permit three-dimensional determination of the feeler element 14 with the aid of conventional evaluation techniques known from industrial photogrammetry. The use of a redundant number of cameras (for example three) enables an object to be measured even when one of the cameras is occluded. In the case of small bores, it suffices to use one camera which is thus optically aligned with the feeler element 14. Separately therefrom, either a tracing element 14 which actively emits, reflects or shields light, or a target 46, 48, 50 is used to determine the structure in the object, light preferably being fed from the light source 44 to the feeler element 14 or the targets 46,

48, 50 via the probe extension 30 constructed as an optical fibre. Alternatively, it is possible to generate the light itself in the probe extension 30 or in the targets 46, 48, 50, or in the feeler element 14 in which these include or are, for example, electrically luminous modules such as LEDs. The teaching according to the invention uses an ideally contrasting and an ideally circular image of the feeler element 14 or the target 46, 48, 50, if these have a spherical shape. In addition or as an alternative, it is possible for the feeler element 14 or the targets 46, 48, 50 to be fluorescent such that irradiated and emitted light are separated in terms of frequency so that the image generated by the feeler element 14 or the target marks 46, 48, 50 can be separated from the surroundings.

Structures of the order of magnitude of 100 μm and less, in particular in the range up to 50 μm , can be determined with a measurement uncertainty of $\pm 0.5 \mu\text{m}$ with the aid of the inventive design of a coordinate measuring machine with which a feeler element such as a feeler ball, or a target uniquely assigned thereto in three dimensions is optically detected in order to determine the structure of the body from the direct optical measurement of the feeler element or the target. Customary measurement volumes such as, for example, $0.5 \times 0.5 \times 0.5 \text{ m}^3$ can be measured with the aid of the coordinate measuring machine.

Figure 12 illustrates a block diagram for the purpose of determining the structure of an object in accordance with the teaching of the invention in a coordinate measuring machine 26 by means of direct optical measurement of the position of a feeler element 58, the aim being for the feeler element 58 to trace the object under CNC control.

The coordinate measuring machine 56 is of conventional design. For example, the feeler element 58 projects from a holder which is fastened on a quill 62, which can be adjusted in the X-direction along a cross beam
5 60 and can, for its part, be adjusted in the Z-direction. The object itself is fastened on a measuring table 64 which can be moved in the Y-direction. If the feeler element 58 traces the object, the coordinates X', Y' and Z' of the feeler element 58 are calculated
10 from the video signals corresponding to the position of the feeler element 58 by means of an image processing system 66, and are fed to a measurement computer 68 and combined therein with the coordinate values X, Y, Z of the coordinate measuring machine 56 which are
15 determined by means of a counter 70. The values thus calculated are used, on the one hand, to determine the object geometry and, on the other hand, to control the CNC running of the coordinate measuring machine 56 via a CNC controller 72.

Werth Messtechnik GmbH
Siemensstraße 19
35394 Gießen

Claims

Coordinate measuring machine for measuring structures 5 of an object

1. Coordinate measuring machine for measuring
structures of an object (12), having a probe comprising
a feeler element (14) and a probe extension (16, 38), a
10 sensor for optically determining the feeler element
(14) and/or at least one target, assigned directly
thereto, and an evaluation unit with the aid of which
it is possible to calculate the structures from the
position of the optical sensor relative to the
15 coordinate system of the coordinate measuring machine
and the position, measured directly by means of the
optical sensor, of the feeler element and/or the
target, characterized in that the probe extension (16,
38) is of flexible design.

20

2. Coordinate measuring machine according to Claim 1,
characterized in that the feeler element (14) and/or
the target (46, 48, 50) are/is designed as a reflector.

25 3. Coordinate measuring machine according to Claim 1
or 2, characterized in that the feeler element (14)
and/or the target (46, 48, 50) are/is of self-radiating
design.

30 4. Coordinate measuring machine according to at least
one of the preceding claims, characterized in that the
feeler element (16) and/or the target (46, 48, 50)
are/is a body such as a ball or cylinder, which emits
or reflects radiation in three dimensions.

5. Coordinate measuring machine according to at least one of the preceding claims, characterized in that the probe extension (38) is designed at least partially as an optical conductor, or comprises such.

5

6. Coordinate measuring machine according to at least one of the preceding claims, characterized in that the probe extension (38, 40), or at least a section thereof, is the feeler element (14) and/or the target
10 (46, 48).

7. Coordinate measuring machine according to at least one of the preceding claims, characterized in that a plurality of targets (46, 48), which preferably project
15 from the probe extension (30) or form sections thereof, are assigned to the feeler element (14).

8. Coordinate measuring machine according to at least one of the preceding claims, characterized in that the
20 probe extension (30) is bent in an L-shaped fashion for alignment with an optical axis (24).

9. Coordinate measuring machine according to at least one of the preceding claims, characterized in that the
25 probe extension (30) is designed as a feeler element (14) at the end.

10. Coordinate measuring machine according to at least one of the preceding claims, characterized in that the
30 feeler element (14) and/or the target (46, 48, 50) are exchangeably connected to the probe extension (30).

11. Coordinate measuring machine according to at least one of the preceding claims, characterized in that the
35 feeler element (14) and/or the target (46, 48, 50) are/is connected to the probe extension (30) by bonding or welding.

12. Coordinate measuring machine according to at least one of the preceding claims, characterized in that the probe (18) projects, preferably exchangeably, from a holder (30) which can be adjusted by at least 3 degrees of freedom, preferably by 5 degrees of freedom.

13. Coordinate measuring machine according to at least one of the preceding claims, characterized in that the probe (18) projects from a holder (20) which forms a unit with the sensor or is connected to the sensor.

14. Coordinate measuring machine according to at least one of the preceding claims, characterized in that the probe (18) can be fed to the object (12) from the side of the latter facing the sensor.

15. Coordinate measuring machine according to at least one of the preceding claims, characterized in that the feeler element (14) and/or the target (46, 48, 50) have/has a self-luminous electronic element such as an LED or is such.

16. Coordinate measuring machine according to at least one of the preceding claims, characterized in that the sensor is an image-processing sensor.

17. Coordinate measuring machine according to at least one of the preceding claims, characterized in that the sensor is a position-sensitive planar sensor.

18. Coordinate measuring machine according to at least one of the preceding claims, characterized in that the diameter of the feeler element (14) is approximately one to three times greater than that of the probe extension (38).

19. Coordinate measuring machine according to at least one of the preceding claims, characterized in that the

probe extension (30) is cylindrical at the end and designed as a feeler element (14).

20. Coordinate measuring machine according to at least
5 one of the preceding claims, characterized in that the probe extension (30) is spherically rounded to form the feeler element.

Abstract

Coordinate measuring machine for measuring structures of an object (12), having a probe comprising a feeler element (14) and a probe extension (16, 38), a sensor for optically determining the feeler element (14) and/or at least one target, assigned directly to the latter, and an evaluation unit with the aid of which it is possible to calculate the structures from the position of the optical sensor relative to the coordinate system of the coordinate measuring machine and the position, measured directly by means of the optical sensor, of the feeler element and/or the target, characterized in that the probe extension (16, 38) is of flexible design.

Fig.1:

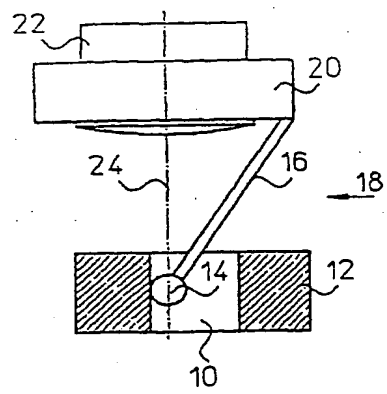


Fig.2:

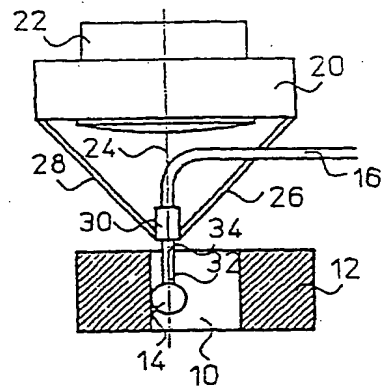


Fig.3:

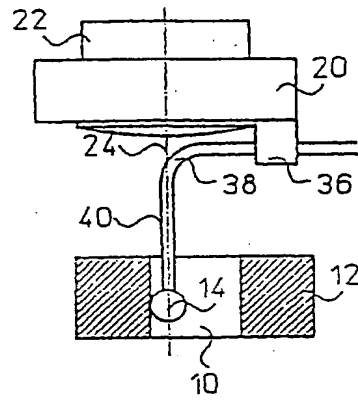
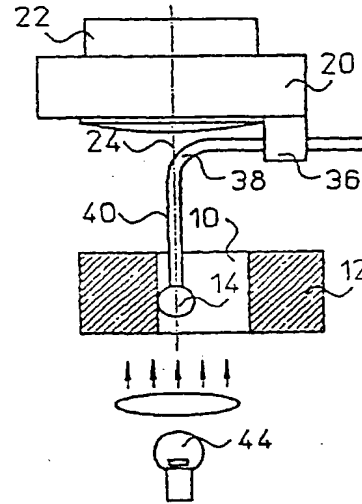


Fig.4:



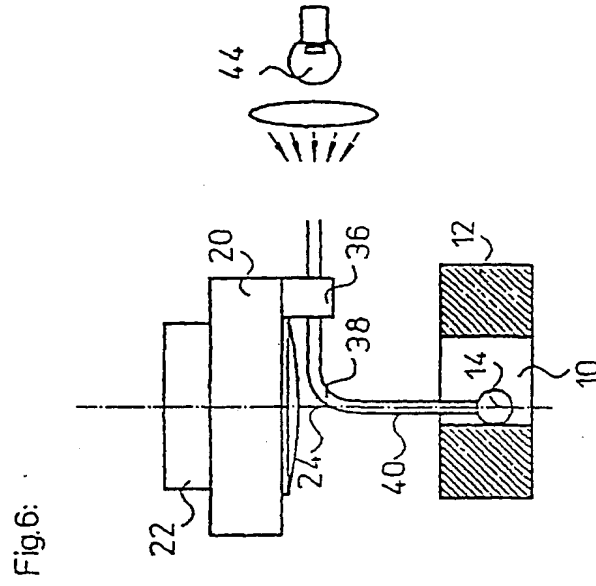
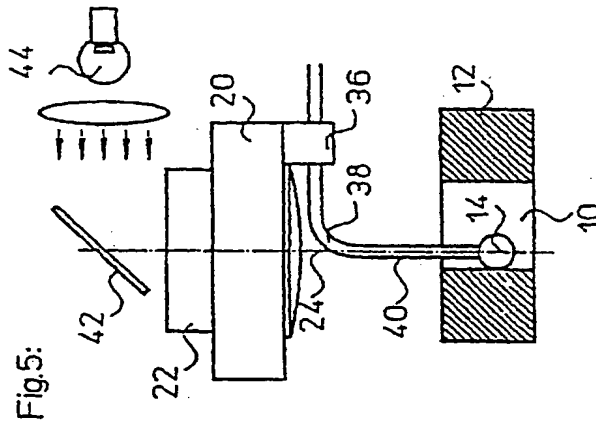


Fig. 7:

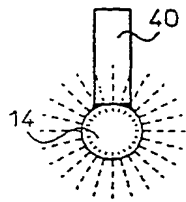


Fig. 8:

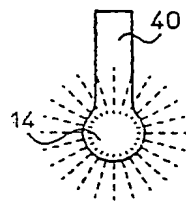
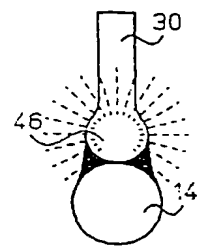


Fig. 9:



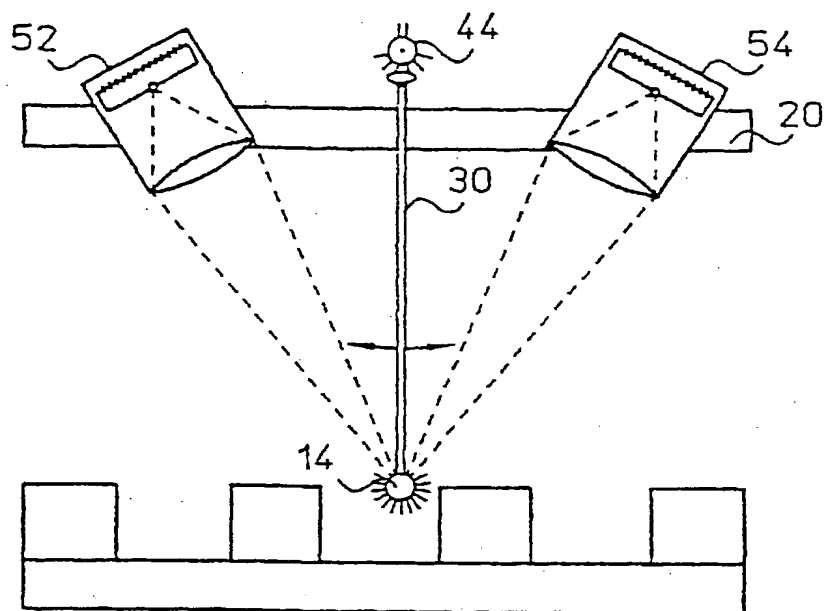


Fig. 10

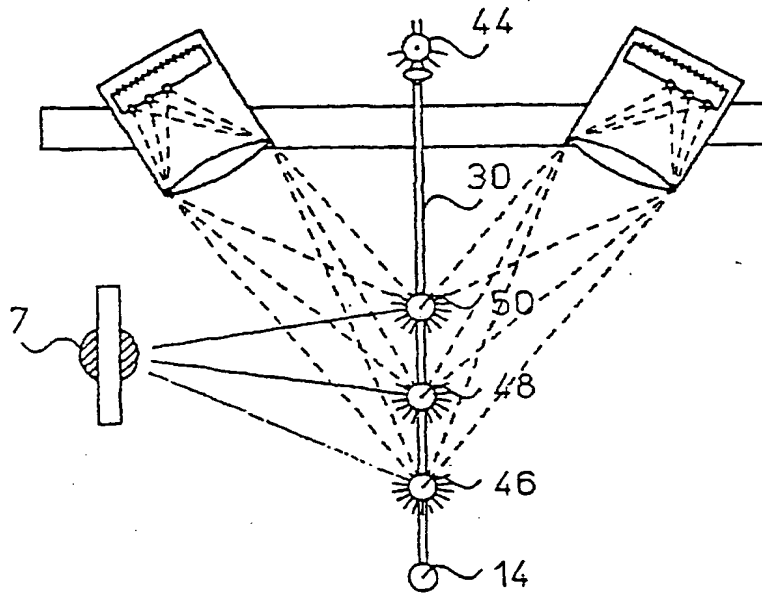


Fig. 11

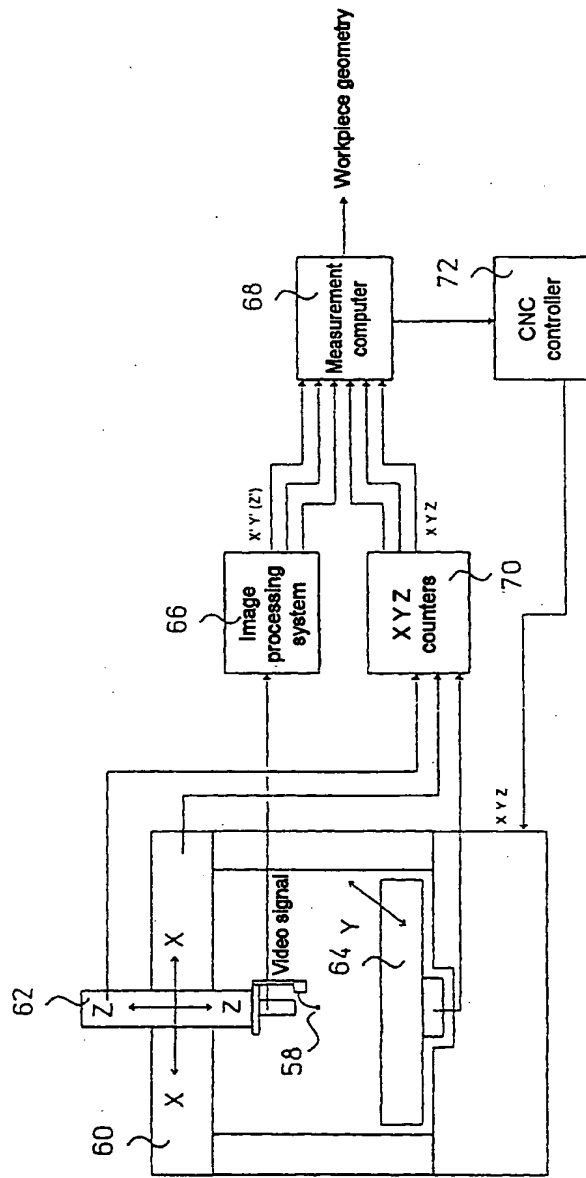


Fig. 12: